OKTOBER 2006 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT

- Savants – schwachsinnig und genial
- Wie die Tiere an Land gingen
- Seltsame Monde im Sonnensystem

www.spektrum.de

Gene für ein langes Leben

Forscher hoffen, dass sich das Leben verlängern lässt – auch ohne Alterskrankheiten

SCHWERPUNKT NANOTECHNOLOGIE

D6179E
13,50 sFr/Luxemburg 8,– €





Reinhard Breuer
Chefredakteur

Werden wir zu Darwins Schildkröten?

Liebe Spektrum-Leser,

im Jahr 2003 starb meine Großtante im Alter von 104 Jahren. In den letzten beiden Lebensjahren hatte sie sich besonders darüber gefreut, die älteste Bürgerin von Regensburg mit seinen 135000 Einwohnern zu sein. Seit Demoskopen eine jährliche Zunahme der mittleren Lebenserwartung um drei Monate prognostizieren, steht zu erwarten, dass mit diesem Alter in Bälde nicht mehr so viel Staat zu machen ist.

Der derzeitige Altersweltrekord für Menschen liegt seit 1997 bei 122 Jahren und 164 Tagen. Aufgestellt hat ihn die Französin Jeanne Louise Calment; der älteste Mann, ein Japaner, soll es auf 120 Jahre gebracht haben. Dem Vorbild aller Übergreise, Methusalem, werden legendäre 969 Jahre nachgesagt. Dass, um einmal die Spezies zu wechseln, eine angebliche »Schildkröte Darwins« im letzten Juni im Alter von 176 Jahren dahinschied, ging zwar durch die Medien, gilt aber unter Fachleuten als Unsinn (»New Scientist«, 15. Juli 2006, S. 21).

Aber könnten Menschen eines Tages wirklich 176 oder gar 969 Jahre alt werden? Manche Forscher halten das für möglich – wie etwa Aubrey de Grey. Der britische Biogerontologe hat längst einen Sieben-Punkte-Plan zur Bekämpfung eines frühen Ablebens vorgelegt, wird aber vom Rest der Wissenschaftsgemeinde eher mit Schweigen bedacht, wohl weil er dabei von einigen unrealistischen Vorstellungen ausgeht.

Den fulminanten Altersschub der letzten Jahrzehnte schreiben Forscher mehreren Faktoren zu: Absenkung der Kindersterblichkeit, besserer Hygiene, gesünderer Ernährung – und einer Medizin, die lebensverkürzende Prozesse zunehmend erkennt und zu stoppen versteht. Darum geht es auch in unserem Beitrag ab S. 34, der sich mit den genetischen Einflüssen auf unser Altern befasst. Offenbar können einige Gene, die vor allem unter widrigen Bedingungen aktiviert werden, bei künstlich stimuliertem Dauereinsatz Organismen langlebiger machen.

Aber wollen wir denn überhaupt so viel älter werden? Wird nicht das Alter für die allermeisten zur Qual, wenn Demenz- und Krebskrankheiten das Leben in ein jämmerliches Siechtum verwandeln? Verblüffenderweise versprechen, wie die Autoren unserer Titelgeschichte herausfanden, eben diese Gene zugleich, altersbedingte Erkrankungen zu unterdrücken – weil sie molekulare Abwehr- und Reparaturmechanismen aktivieren.

Könnte also »alt und vital« bald zum gesellschaftlichen Alltag werden? Sollen wir uns, wie Aubrey de Grey oder zahlreiche Sciencefiction-Romane, die Städte mit 150- und 200-Jährigen bevölkert vorstellen, sodass im Jahr 2100 auch meine Großtante mit 104 Lenzen als Frau in den mittleren Jahren gelten würde? Die Molekularbiologie, so scheint es, ist derzeit dabei, die Grundlagen dafür zu schaffen.

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

OKTOBER 2006

SPEKTROGRAMM

FORSCHUNG AKTUELL

THEMEN

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet; die mit 🔊 markierten Artikel können Sie als Audiodatei im Internet beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

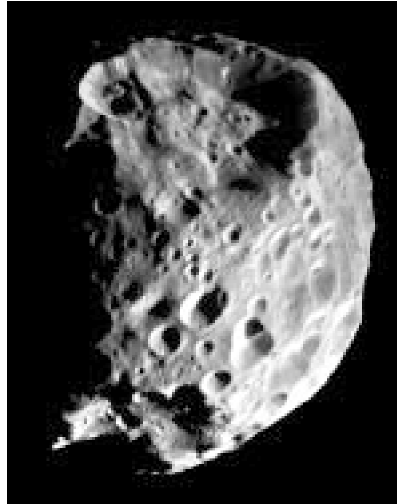


SEITE 24

EVOLUTION

Was Fischen Beine machte

Lehrbücher müssen umgeschrieben werden: Die ersten Vierfüßer wagten sich noch nicht aufs Land. Sie schnappten nur über dem Wasser nach Luft – und stemmten sich dazu hoch



SEITE 44

ASTRONOMIE

Monde auf der schiefen Bahn

Sie bewegen sich auf lang gestreckten und verwickelten Bahnen, oftmals gegen die im Sonnensystem übliche Richtung – eine Art planetarer Satelliten, deren Eigenheiten Neues über die Entstehung der Planeten verraten



SEITE 68

HIRNFORSCHUNG

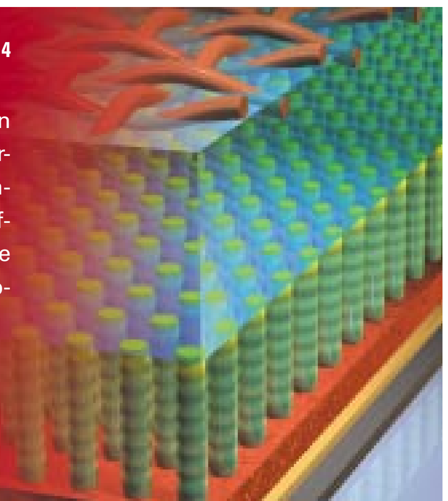
Ein Mensch mit phänomenalem Gedächtnis

Savants verfügen über extreme Sonderbegabungen, oft bei schweren geistigen Defiziten. Der Amerikaner Kim Peek besitzt ein unheimliches Gedächtnis. Ungewöhnlich sieht auch sein Gehirn aus

SCHWERPUNKT AB SEITE 54

Nanotechnologie

Maschinen aus wenigen Atomen und Molekülen – allmählich werden solche Visionen Realität, während gleichzeitig neue Fragen aufkommen. Zum Beispiel: Wie viele Moleküle braucht ein Wassertropfen, um Wasser zu sein?



TITELTHEMA MOLEKULARBIOLOGIE SEITE 34

Regulatoren der Lebensspanne

Gesund ein biblisches Alter erreichen – eine Hand voll Gene für natürliche Schutzmechanismen lassen sich vielleicht als Waffen gegen Krankheiten und Verfallsprozesse einsetzen, die synonym für Altern stehen

SEITE 74

METAMATERIALIEN

Bauplan für eine Superlinse

Komplizierte Mikrostrukturen – Metamaterialien – verhalten sich optisch paradox. Eine Schicht aus solchem Material vermag feinere Details abzubilden als jede gewöhnliche Linse

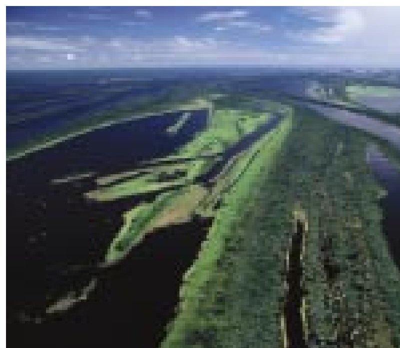


SEITE 84

NATURGESCHICHTE

Die Geburt des Amazonas

Nach neuesten Erkenntnissen dauerte es mehrere Millionen Jahre, bis sich der mächtige Strom seinen Weg quer durch Südamerika gebahnt hatte



OKTOBER 2006

KOMMENTAR

WISSENSCHAFT IM ...

JUNGE WISSENSCHAFT

REZENSIONEN

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

WEITERE RUBRIKEN

TITELBILD



Eine Altersbremse in unserem Genrepertoire, symbolisiert durch die DNA-Doppelhelix, wollen Forscher finden – und aktivieren

Hände: Corbis; DNA: Siganim; Composing: Claus Schäfer / Spektrum der Wissenschaft

LESERBRIEFE

Streng sachlich statt effekthascherisch

Die Mischung macht's
Forschung aktuell, August 2006

Seit mehr als 30 Jahren werden Wirkungen von Stoffgemischen wissenschaftlich eingehend untersucht. Dabei wurden für einige Kombinationen auch synergistische oder potenzierende Wirkungen beobachtet, welche allerdings mechanistisch erklärbar sind und damit einem fachgerechten Risikomanagement unterworfen werden können.

Beide Sachverhalte lässt David Biello unberücksichtigt. Hingegen werden die effekthascherischen Analogien von Tyrone Hayes zwischen Kaulquappen in Gewässertümpeln und Föten in der Gebärmutter zitiert, die eine themengerechte Auseinandersetzung mit dem gegenwärtigen Erkenntnisstand erschweren. In einer Gesellschaft, die technische Entwicklungen zunehmend nur nach dem Risikopotenzial bewertet, erfordern komplexe Sachverhalte mit ihrem hohen Verunsicherungspotenzial gerade von wissenschaftlich ausgerichteten Zeitschriften eine streng sachliche Themendarstellung.

Dr. Richard Schmuck, Wuppertal

Nicht der richtige Weg

Der erbitterte Kampf gegen Malaria
Juni 2006

Speziell im Fall der Malaria war bereits in den 1960er Jahren gesicherte Erkenntnis, dass der massive Einsatz von DDT und anderen Insektiziden nicht der richtige Weg zur Bekämpfung ist. An den damaligen diesbezüglichen Erfahrungen und Erkenntnissen hat sich seitdem nichts geändert. Und das kommt mir im Artikel viel zu kurz.

Natürlich erfordern biologische Forschung und gesundheitliche Erziehung einen langen Atem und tragfähige Infrastrukturen. Aber ohne diese Anstrengungen ist der erneute Einsatz von DDT, und sei es in kleinerem Maßstab, nicht zu verantworten. Oder sollte etwa das eigentliche Ziel der Propagierung das beträchtliche Profitpotenzial bei der industriellen Produktion von DDT sein? Zwei Hinweise verstärken bei mir diesen Eindruck: »Präsident Bush hat 1,2 Milliarden US-Dollar dafür vorgesehen, um die Seuche in den nächsten fünf Jahren in Afrika zu bekämpfen« und der Literaturhinweis »What the world needs now is DDT«.

Prof. Dieter Wenzel, Braunschweig

Individuelle Duftstoffe mitentscheidend

Sommer, Sonne, Schweißgeruch?
Wissenschaft im Alltag, August 2006

Heute – nach der Hygienewut des 20. Jahrhunderts – weiß man dank biomedizinischer Forschung, dass die von den apokrinen Schweißdrüsen erzeugten individuellen Duftstoffe nicht nur »in grauer Vorzeit« eine Rolle bei der Partnerwahl spielten, sondern dies heute noch tun und mit darüber entscheiden, ob man »sich riechen kann« oder nicht. Auch ist inzwischen erwiesen, dass – im Gegensatz zu übertriebener Hygiene und Deodorants – die im Schweiß enthaltenen Substanzen zur Gesunderhaltung der Haut beitragen, selbst wenn man sich nicht wie die Ureinwohner Australiens mit seinem Achselschweiß einreibt.

Dr. Gerhard Rudolf, Bad Homburg

Versuch mit Gott

Nur ein frommer Wunsch
Forschung aktuell, Juli 2006

Beten heißt, dass sich Menschen an Gott mit Dank oder auch Bitte wenden, etwa der Bitte um Hilfe zur Genesung von Kranken. Da haben nun Wissenschaftler zwei Gruppen gebildet, von denen die eine das Medikament Beten verordnet bekam, die andere aber nicht. Dieses Experiment will im Endeffekt nicht nur feststellen, ob das Beten hilft, sondern auch, ob Gott reagiert oder nicht, ob Gott existiert oder nicht. Gott ist somit zu einem Versuchskaninchen der Wissenschaftler geworden. Wer auch nur eine ungefähre Ahnung hat, was man unter dem Wort »Gott« versteht, weiß, dass wir seine Wege nicht auskundschaften können.

Dass Gott, wenn es ihn gibt, auf vielfältige Weise helfen kann, die keine Versuchsanordnung ergründet, ist sicherlich auch für einen Atheisten selbstverständlich.

Prof. Franz Burgey, Dietramszell-Linden

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Götz Hoeppe, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Heidelberg, HRB 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Rainer Kayser, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Silke Lissek, Dr. Achim Schneider, Dr. Frank Scholz, Dr. Michael Springer.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, D-70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de
Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Hartmut Brendt, Tel. 0211 6188-145, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße 17/I, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: fs//partner, Stefan Schließmann, Friedrich Sültemeier, Bastionstraße 6a, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 862997-0, Fax 0211 132410; Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, D-80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 27 vom 01. 01. 2006.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: John Sargent, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President/Managing Director, International: Dean Sanderson



Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.




SABINE LÖBBE

▲ Dieser Zirkumhorizontalbogen wurde auf der Nordinsel Neuseelands fotografiert. Das Phänomen entsteht, wenn sich Sonnenstrahlen an den hexagonalen Eiskristallen von mehrere Kilometer hohen Zirruswolken brechen.

Spektrales Wolkenglühen

Bild des Monats, September 2006

Live erlebt

Vielen Dank für dieses schöne Foto eines Zirkumhorizontalbogens und die Erklärung dazu.

Nun kann ich mir eine Erscheinung zwischen den Wolken erklären, die ich auf der Nordinsel Neuseelands am 27. März dieses Jahres gesehen und auch fotografiert habe. Da es nicht regnete und ich die Sonne auch nicht im Rücken hatte, konnte es kein Teil eines Regenbogens sein. Und ich stellte mir die Frage: Was ist das? Nun weiß ich es.

Sabine Löbbe, Hamburg

Brechung statt Beugung

Bei dieser Erscheinung handelt es sich um Brechung, nicht um Beugung.

Prof. Walter Eichenauer, Bonn

Ergebnisse einbringen

Wissenschaftler – Hände weg von der Politik
Essay, September 2006

Daniel Sarewitz hat in mehreren Punkten Recht: Wissenschaft kann politische Konflikte nicht entscheiden, Forschungsergebnisse lassen verschiedene Deutungen zu, Werte und Interessen spielen in der Forschung eine Rolle. Richtig ist auch, dass Wissenschaft Politik nicht ersetzen kann und nicht zum Konfliktschlichter taugt.

Falsch ist jedoch die Schlussfolgerung, die Sarewitz daraus zieht, indem er Wissenschaftler zur politischen Abstinenz auffordert. Was wir brauchen, ist gute Politik, gute Wissenschaft und die richtigen Formen, um beides zu konsensfähigen Problemlösungen zu bündeln.

Wie unsere Studie zur Beteiligung von Wissenschaftlern an der Klimadiskussion zeigt, sind viele Forscher bereit, sich in öffentliche politische Debatten einzumischen. Sie tun dies oft mit Bauchschmerzen, manchmal ungeschickt, gelegentlich aus egoistischen Gründen. Aber viele tun es auch in der Überzeugung, dass sie zwar keine fertige politische Lösung präsentieren, aber einen wichtigen Beitrag dazu leisten können.

Wir finden es richtig, dass Wissenschaftler ihre Ergebnisse selbst in die politische Diskussion einbringen, statt dies Dritten zu überlassen und selbst vornehme Zurückhaltung zu üben.

Prof. Hans Peter Peters, Jülich,
Prof. Harald Heinrichs, Lüneburg

Briefe an die Redaktion …

… sind willkommen! Schreiben Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Frau Ursula Wessels
Postfach 104840
D-69038 Heidelberg
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Erratum

Ring der Erkenntnis, September 2006

In der Bildunterschrift auf S. 86 wurden fälschlich aus Myonen Mesonen. Das Higgs-Teilchen zerfällt in 4 Myonen.

Die Redaktion



DEUTSCHES PRIMATENZENTRUM, RODE-BROCKHAUSEN

VERHALTEN

Aufmerksamkeits-lupe im Kopf

Wie kommt es, dass wir beim Autofahren konzentriert auf die Straße vor uns blicken und das Stoppschild am Straßenrand dennoch nicht übersehen? Offenbar alles nur eine Frage der Aufmerksamkeit. Wissenschaftler um Thilo Womelsdorf und Stefan Treue vom Deutschen Primatenzentrum in Göttingen haben die Vorgänge an Rhesusaffen untersucht und eine Art Tuning von Nervenzellen im Gehirn entdeckt. Die Forscher »verkabelten« die Hirnrinde mit kleinen Elektroden. Vor allem die Region MT, ein auf die Wahrnehmung von Bewegungen spezialisierter Bereich, stand im Zentrum ihres Interesses.

Auch wenn er in eine andere Richtung blickt: Durch die Lupe im Kopf nimmt der Affe den Käfer am Bildrand genau wahr.

NEUROBIOLOGIE

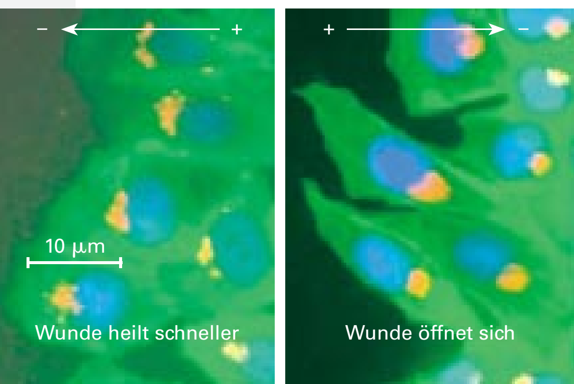
Elektrischer Wegweiser für Zellen

Woher wissen Zellen, wo und in welche Richtung eine Wunde im Gewebe heilen muss? Neben chemischen Stoffen weisen ihnen offenbar auch elektrische Felder den Weg. Eine solche »Elektrotaxis« wurde zwar schon lange vermutet, den Nachweis erbrachten jedoch erst jetzt Forscher um Min Zhao von der Universität Aberdeen, Schottland. Dazu legten sie elektrische Felder an »Verletzungen« in einer künstlichen Deckgewebsschicht (Epithel) sowie an echte Wunden in der explantierten Augenhornhaut von Nagetieren. Je nach Richtung des Felds wurde die Heilung beschleunigt oder gebremst.

Bei der Elektrotaxis spielt offenbar das Protein PI(3)K Gamma – wichtig für den chemischen Spürsinn der Zellen – eine Rolle. Das zeigte sich, als die Wissenschaftler das zugehörige Gen in den Epithelzellen ausschalteten: Diese bewegten sich im angelegten elektrischen Feld daraufhin nur noch unkoordiniert. Inaktivierten die Forscher dagegen ein anderes Gen, das letztendlich die von PI(3)K Gamma angestoßene Singalkaskade hemmt, stieg die Geschwindigkeit, mit der die Zellen dem Feld folgten – und zwar um ganze 30 Prozent.

Diese Erkenntnisse könnten für die Behandlung chronischer Wunden oder anderer Verletzungen nützlich sein.

Nature, 27.7. 2006, S. 457

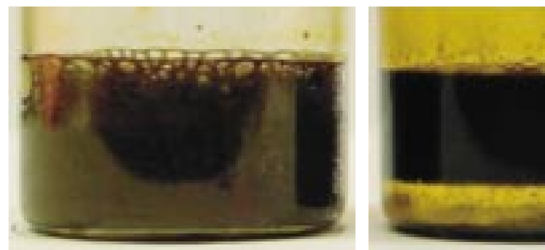


MIN ZHAO, UNIVERSITY OF ABERDEEN

Epithelzellen drehen sich in einem elektrischen Feld so, dass der Golgi-Apparat (orange) – ein internes Membransystem – zum Minuspol weist, und wandern dorthin (blau: Zellkern, grün: Aktin).

CHEMIE

Emulgator mit Schalter



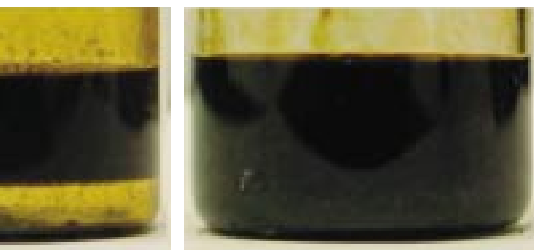
Ölsande bergen weltweit etwa 16 Prozent der Ölreserven. Um daraus den begehrten Energieträger zu extrahieren, wird eine wässrige Tensid-Lösung eingesetzt. Das »Spülmittel« bewirkt, dass sich das Öl in Form feiner Tröpfchen im Wasser verteilt. Am Ende muss die so entstandene Emulsion aber wieder getrennt werden – ein Prozess, der zeit- und kostenintensiv ist.

In Zukunft wird das vielleicht einfacher. Chemiker aus Kanada und den USA haben eine Substanz aus der Klasse der Alkylamidine entwickelt, deren

Wurden die Affen darauf trainiert, ihren Blick fest, ohne abzuschweifen, auf einen Punkt auf einem Bildschirm zu richten und dabei gleichzeitig auf einen bestimmten Bereich am Rand ihres Gesichtsfelds zu achten, reagierten gewisse Hirnzellen in der Region MT stärker auf Bewegungen im Nebenfokus der Aufmerksamkeit – die Sinne für diese Stelle hatten sich gleichsam geschärft. Diese Aufmerksamkeitslupe schaltet sich schon ganz früh ein; denn die Region MT ist bereits an den ersten Schritten der visuellen Informationsverarbeitung beteiligt. Die Forscher glauben, dass sich ihre Erkenntnisse ohne Weiteres auf den Menschen übertragen lassen: Unser visuelles System unterscheide sich in diesem Gehirnbereich kaum von dem der Affen.

Nature Neuroscience, 9/2006, S. 1156

▼ Eine Öl-Wasser-Emulsion, erzeugt mit einem Hilfsstoff und CO_2 (links), trennt sich nach Erwärmen und Durchleiten von Argon rasch wieder (Mitte). Anderenfalls hält sie sich stundenlang (rechts).



PHILIP JESSOP, QUEEN'S UNIVERSITY, KANADA

Moleküle sich bei Raumtemperatur mit Kohlendioxid zu einem stark wirkenden Tensid verbinden. Die Besonderheit: Lässt man durch die Emulsion später bei einer Temperatur von 65 Grad Celsius Luft, Stickstoff oder Argon strömen, wird die Reaktion rückgängig gemacht: Das Tensid zersetzt sich und das Öl trennt sich wieder vom Wasser. Solche schalt- und wiederverwertbaren Emulgatoren sind auch für viele andere industrielle Prozesse interessant – etwa für die Herstellung von Nanopartikeln.

Science, 18.8. 2006, S. 958

KOSMOLOGIE

Das versteckte Deuterium



NASA / FUSE

Der Satellit Fuse maß den Deuteriumgehalt im All – so auch in der Kleinen Magellanschen Wolke.

Anders als in weit entfernten Galaxien, die wir gewissermaßen noch in ihrem Jugendstadium sehen, ist in unserer unmittelbaren kosmischen Umgebung überraschend wenig Deuterium zu beobachten. Bisher machten Astronomen Sterne dafür verantwortlich, die das schwere Wasserstoff-Isotop durch Kernfusion in Helium und andere Elemente umwandeln. Spektralmessungen des Satelliten Fuse (»Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer«) weisen nun aber auf eine weitere mögliche Erklärung hin. Bei der Analyse der Daten entdeckten Wissenschaftler um Jeffrey Linsky von der Universität von Colorado in Boulder, dass dort, wo viel interstellarer Staub vorhanden sein muss, anscheinend wenig Deuterium vorkommt und umgekehrt. Die Forscher entwickelten daraufhin ein Modell, wonach die Staubteilchen das Isotop an sich binden und so dem Blick der Astronomen entziehen. Vermutlich gibt es in unserer kosmischen Nachbarschaft also mehr Deuterium, als es den Anschein hat.

Astrophysical Journal 20. 8. 2006, S.1106

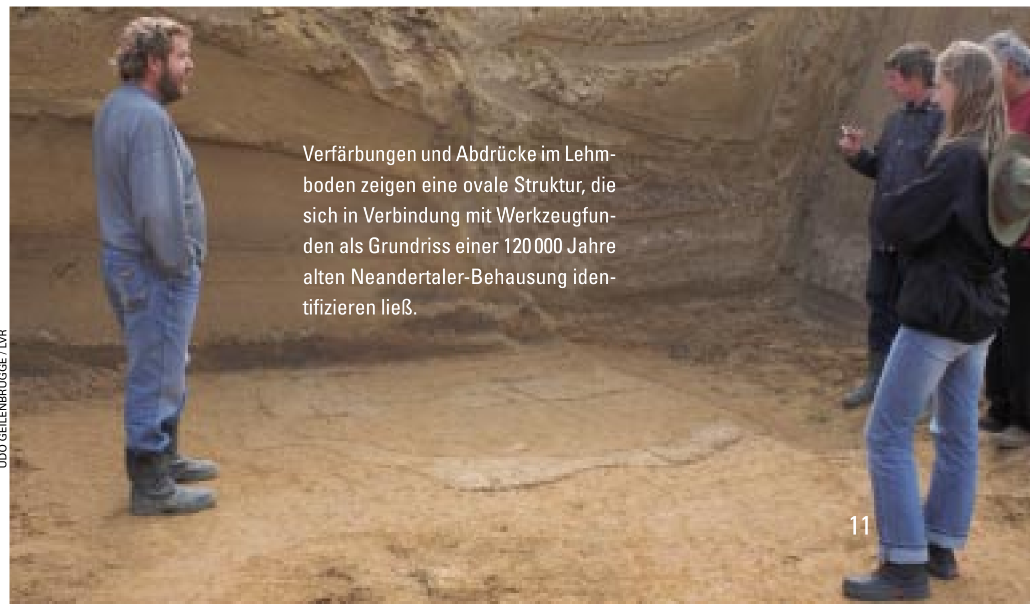
ARCHÄOLOGIE

Neandertaler-Behausung entdeckt

Nach landläufiger Vorstellung war der Neandertaler ein tumber Geselle, der Steinkeulen schwang und in Höhlen hauste. Doch dieses Zerrbild hat mit der Wirklichkeit wenig zu tun. So entdeckten schon in den 1980er Jahren Wissenschaftler bei Buhlen in Hessen die Überreste einer vier Quadratmeter großen künstlichen Behausung, in der vor 35000 bis 40000 Jahren Neandertaler gelebt und Steinwerkzeuge hergestellt hatten.

Nun konnten Archäologen vom Rheinischen Amt für Bodendenkmalpflege zeigen, dass die mittelsteinzeitlichen Jäger und Sammler auch schon viel früher zelt- oder hüttenartige Strukturen bauten. Bei Rettungsgrabungen an der Braunkohlegrube Inden nahe der nordrheinwestfälischen Stadt Titz entdeckten die Forscher den Grundriss einer ovalen Behausung, der sich durch Verfärbungen und Abdrücke im lehmigen Boden abzeichnete. Im Umfeld lagen rund sechzig Werkzeuge aus Feuerstein wie Axtkeile und Klingen zum Schneiden von Fleisch oder Fellen, die nach Schätzung der Archäologen etwa 120000 Jahre alt sind und damit aus der Frühzeit des Neandertalers stammen. Von der Behausung selbst ist nichts mehr übrig, da sie aus vergänglichen Materialien wie Holz oder Fellen bestanden haben dürfte.

Pressemitteilung des Landschaftsverbands Rheinland vom 15. 8. 2006



UDO GEILENBRÜGGE / LVR

Verfärbungen und Abdrücke im Lehmboden zeigen eine ovale Struktur, die sich in Verbindung mit Werkzeugfunden als Grundriss einer 120000 Jahre alten Neandertaler-Behausung identifizieren ließ.



JAMSTEC, FUMIO INAGAKI

▲ Mit dem Tauchboot Shinkai 6500 holten deutsche und japanische Forscher Proben aus den Sedimentschichten über einem Kohlendioxid-See.

MIKROBIOLOGIE

Leben am Kohlendioxid-See

Flüssiges Kohlendioxid (CO_2), neuerdings eingesetzt bei der Trockenreinigung von Textilien, wirkt ähnlich wie ein organisches Lösungsmittel. Kaum vorstellbar, dass in einem damit getränkten Milieu Organismen dauerhaft überleben können. Deutsche und japanische Wissenschaftler haben jetzt das Gegenteil bewiesen. In einem hydrothermalen Feld in 1400 Meter Wassertiefe vor der Ostküste Taiwans verbirgt sich unter einer Sedimentschicht ein natürlicher Kohlendioxid-See. Durch den hohen Unterwasserdruck liegt das eigentlich gasförmige CO_2 in flüssiger Form vor. Es perlt durch die darüberliegende Schicht aus eisartigem CO_2-Hydrat und aufgelagertem Sediment.

Mit einem bemannten Tauchboot entnahmen die Wissenschaftler Sedimentproben und untersuchten sie mittels DNA-Analyse auf mikrobielles Leben. Das Ergebnis: Hier gedeihen Archaeen, eine früher Archaebakterien genannte Organismengruppe, die eine Vorliebe für extreme Umweltbedingungen hat.

An der Grenzfläche zum CO_2-See fanden sich noch etwa 10 Millionen Mikroben pro Kubikzentimeter; zwanzig Zentimeter höher im Sediment – bei deutlich geringerem Kohlendioxidgehalt – immerhin über eine Milliarde. Das hören Astrobiologen sicher gern. Sie hoffen, dass Leben im Umfeld von flüssigem oder festem CO_2 existieren kann – und damit womöglich auch in bestimmten Regionen auf dem Mars.

Proceedings of the National Academy of Sciences, Online-Vorabveröffentlichung, 28. 8. 2006

Mitarbeit: E. Buyer, S. Hügler und S. Gellweiler

ELEKTRONIK

Atom schaltet Strom

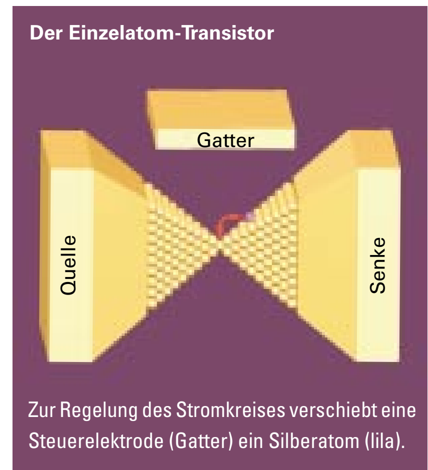
Strom marsch! Wie auf Kommando wechselt ein einzelnes Silberatom den Platz, verbindet zwei Elektroden und schon fließen Elektronen. Eine dritte Elektrode kontrolliert die Position der atomaren Brücke. Entwickelt wurde dieser winzige Transistor an der Universität Karlsruhe.

»10 000 Millionen Elektronen wandern pro Sekunde im Gänsemarsch durch das eine Atom!«, schwärmt Entwickler Thomas Schimmel. Während elektronische Bauteile normalerweise die Eigenschaften von Halbleitern nutzen, um Stromfluss oder Spannung zu regeln, ist dies der erste Metalltransistor.

Sein großer Vorzug: Er kommt mit einer Kontrollspannung von wenigen Millivolt aus, was den Verbrauch an elektrischer Leistung um den Faktor 10 000 senkt. Bei der Herstellung dampfen die Wissenschaftler Silberatome Lage für Lage auf zwei durch eine kleine Lücke getrennte Elektroden auf, bis ein einziges Atom die Brücke bildet. Ein weiterer Vorteil dieser Konstruktion: Der Metalltransistor kann tausendmal schneller schalten als seine Pendants auf Halbleiterbasis.

Universität Karlsruhe, Presseinformation vom 14. 8. 2006

Der Einzelatom-Transistor



THOMAS SCHIMMEL

Zur Regelung des Stromkreises verschiebt eine Steuerelektrode (Gatter) ein Silberatom (lila).

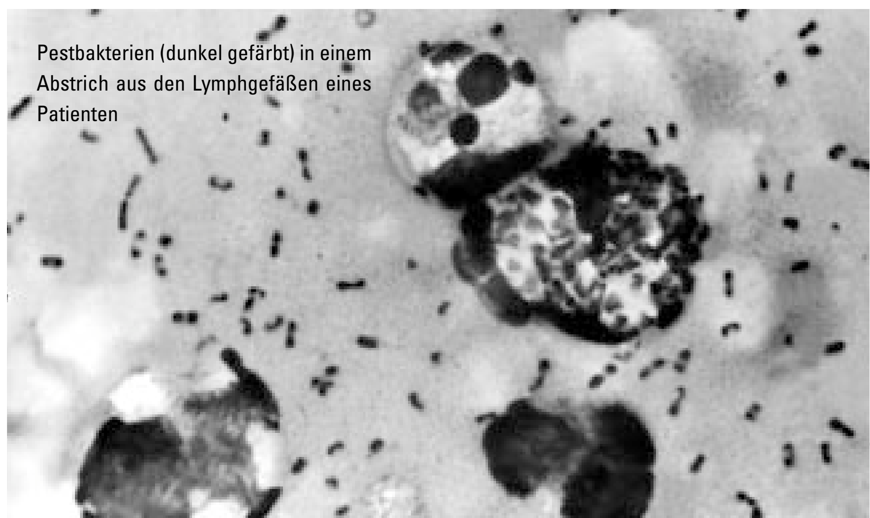
EPIDEMIOLOGIE

Prima Klima für die Pest

Der Erreger der Pest liebt feuchte Wärme. Ein Klimawandel könnte die durchaus nicht ausgerottete Seuche darum wieder häufiger ausbrechen lassen. So sind Populationen Großer Rennmäuse in Zentralasien noch immer Ansteckungsherde, da die Tiere zu den Hauptwirten des Pestbakteriums gehören.

Untersuchungen einer Gruppe von Forschern um Nils Stenseth von der Universität Oslo zeigten, dass die Häufigkeit von *Yersinia pestis* sowohl von der Dichte der Mäusepopulation als auch von der Anzahl an Flöhen abhängt, die den Erreger übertragen. Ist nun das Frühjahr warm oder der Sommer feucht, so gedeihen Wirt und Überträger besonders gut. Die Bevölkerungsdichte der Rennmäuse macht es den zahlreichen Flöhen dann leicht, die Beulenpest zu verbreiten. Ein nur ein Grad Celsius wärmerer Frühling bedeutet den neuen Berechnungen nach, dass die Ausbruchshäufigkeit um fast sechzig Prozent zunimmt. Ein Sommer mit zehn Prozent mehr Niederschlag erhöht sie um sieben Prozent.

Proceedings of the National Academy of Sciences, 29. 8. 2006, S. 13110



Pestbakterien (dunkel gefärbt) in einem Abstrich aus den Lymphgefäßen eines Patienten

CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION (CDC), MARGARET PARSONS, KARL F. MEYER, 1965

Pferdekopf in Blau

Zu den bekanntesten Himmelsobjekten zählt der Pferdekopfnebel im Sternbild Orion, der sich als schwarze Silhouette gegen einen dramatisch roten Hintergrund abzeichnet. Das gleiche Motiv gibt es – in weniger plastischer Form – aber auch im Sternbild Skorpion. Ganz in Blau erinnert es hier an eines der bekanntesten Bilder des Malers Franz Marc. Wie beim Pferdekopfnebel handelt es sich um Wolken aus sehr feinem Staub. Anders als dort blockieren sie jedoch nicht helles Licht aus dem Hintergrund, sondern reflektieren bläuliche Strahlung, die von sehr heißen, intensiv leuchtenden Sternen dicht vor ihnen ausgeht.

Der gezeigte Reflexionsnebel trägt den Katalognamen IC 4592, und die Beleuchtungsquelle – das Auge des Pferdes (links von der Mitte) – ist die etwa 440 Lichtjahre entfernte Hauptkomponente des Trios Nü Scorpii, das mit bloßem Auge als ein Stern erscheint und den alten arabischen Namen Jabbah trägt. Ein zweiter Reflexionsnebel namens IC 4601 umgibt die beiden Sterne rechts oben. Für das Bild hat der Astrofotograf Robert Gendler Aufnahmen seiner Kollegen Jim Misti und Steve Mazlin elektronisch nachbearbeitet.

ROBERT GENDLER, JIM MISTI UND STEVE MAZLIN



ALBERT GERDES, AWI BREMERHAVEN

KLIMATOLOGIE

Riviera in der Arktis

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Vor 55 Millionen Jahren war das Wasser am Nordpol bis zu 24 Grad Celsius warm. Das zeigen Gesteinsbohrungen einer europäischen Expedition im Arktischen Meer.

Im treibenden Packeis musste sich die Vidar Viking (links) exakt senkrecht über dem Bohrloch halten. Um ihr dies zu erleichtern, kreuzten zwei andere Eisbrecher im Luv-Bereich der Meeresströmung vor ihr: die schwedische Oden (Mittelgrund) und die atomgetriebene russische Sowjetski Sojus (Hintergrund).

Von Sven Titz

Polare Eiskappen gibt es – gemessen an geologischen Zeiträumen – noch nicht lange. Vor 55 Millionen Jahren, als das Paläozän ins Eozän überging, herrschte auf der Erde ein viel stärkerer Treibhauseffekt als heute: Die Luft enthielt mehr als fünfmal so viel Kohlendioxid. In diesem sehr warmen Klima waren die Pole eisfrei.

Erst vor 43 Millionen Jahren begannen Gletscher die Antarktis zu überziehen. Wann am Nordpol die Vereisung einsetzte und wie sie ablief, war dagegen bislang kaum bekannt. Jetzt liefert die Auswertung einer europäischen Arktisexpedition vom August 2004 interessante Antworten – und wirft neue Fragen auf.

Das Unternehmen erschien gewagt: Von dem schwedischen Eisbrecher Vidar Viking aus sollte tausend Meter unter dem Meeresspiegel ins Gestein gebohrt werden. Was schon in einem normalen Ozean eine große Herausforderung darstellt, ist in der Arktis noch um einiges schwieriger. Dicht an dicht strömende Packeisschollen drohen sich am Bohrschiff zu stauen und es von der Untersuchungsstelle fortzutreiben, wodurch das Bohrgestänge abbrechen kann.

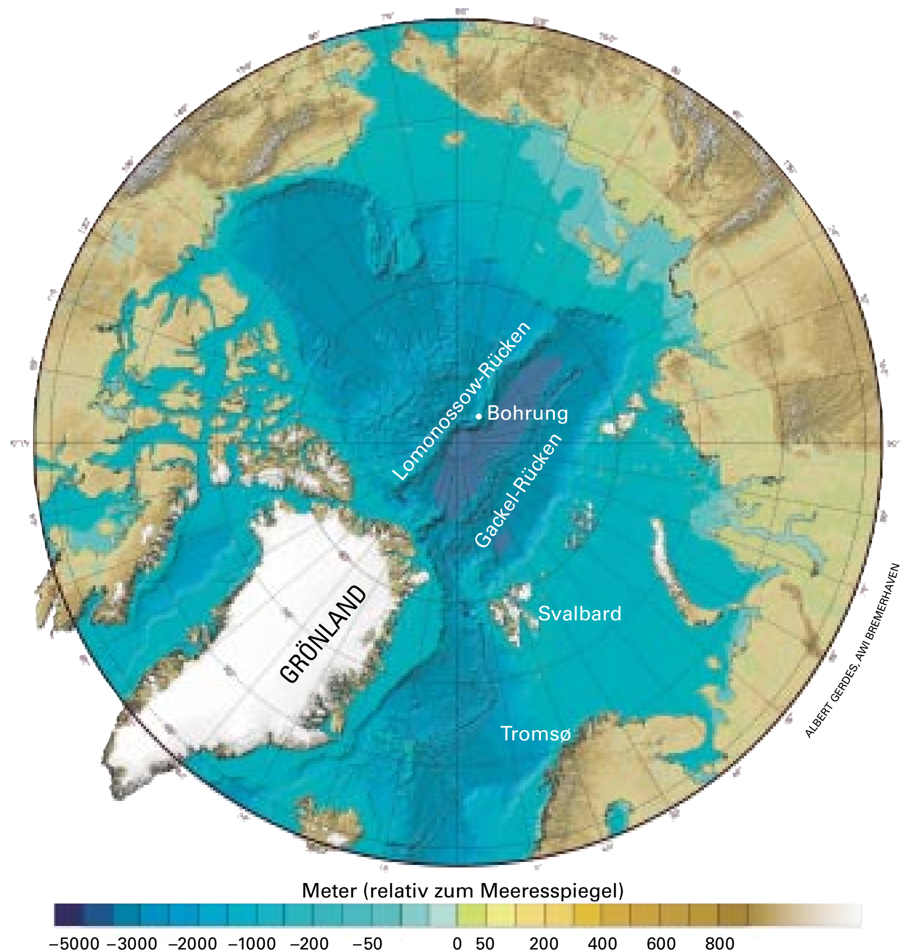
Um das zu verhindern, heuerte das Team der Arctic Coring Expedition (ACEX) zwei weitere Eisbrecher an: die russische, nuklear betriebene Sowjetski Sojus und die schwedische Oden. Sie kreuzten im Luv der Meeresströmung vor der Vidar Viking, um die Eisschollen zu zermalmen, die auf das Bohrschiff zutrieben. Dieses schaffte es so, stets genau senkrecht über der Untersuchungsstelle zu verharren.

Das erbohrte Sedimentgestein stammt vom Lomonossow-Rücken, der sich bis auf rund hundert Kilometer dem Nordpol nähert. Dieser Teil der Erdkruste war vor ungefähr 57 Millionen Jahren von der eurasischen Kontinentalplatte abgebrochen, nach Norden gedriftet und dabei abgesunken. Auf dem Rücken lagerten sich im Lauf der Jahrmillionen Sedimente ab – mit einer Rate von bis zu zwei Zentimetern pro Jahrtausend.

Die Bohrung hat 430 Meter davon zu Tage befördert. Sie dokumentieren Klima und Leben der vergangenen 56 Millionen Jahre im arktischen Becken. Zuvor hatten

nur Sedimentkerne der vergangenen 200 000 bis 500 000 Jahre und ein paar vereinzelte Befunde aus früheren Epochen existiert. Mit einem Schlag bietet sich somit nun ein Blick in die Geschichte des arktischen Klimas, der über hundertmal so weit reicht wie bisher. Allerdings sammelte sich zu manchen Zeiten – zwischen 44 und 16 Millionen Jahre vor heute – nur ziemlich wenig Material an, was die Interpretation erschwert.

In einer »Onshore Science Party« mit 32 Teilnehmern, die unter der Leitung von Ursula Röhl vom 8. bis 23. November 2004 im Bohrkernlager der Universität Bremen stattfand, wurden die kostbaren Bohrkerne untersucht und ausgewertet. Ein großes internationales Forscherteam publizierte jetzt in drei ▷



Bei einer Expedition im August 2004 bohrte der schwedische Eisbrecher Vidar Viking 430 Meter tief in den Lomonossow-Rücken, der sich bis auf rund hundert Kilometer dem Nordpol nähert. Die gewonnenen Sedimentproben bilden ein lückenloses Klimaarchiv der Arktis in den letzten 56 Millionen Jahren.

▷ Fachartikeln die neuen Erkenntnisse, die sich dabei über die einstigen Lebens- und Klimabedingungen der Arktis ergaben *(Nature, Bd. 441, S. 601, 606 und 610)*.

Manches davon ist frappierend. So fand Apply Sluijs von der Universität Utrecht (Niederlande) zusammen mit zahlreichen Kollegen heraus, dass am Nordpol vor 55 Millionen Jahren Verhältnisse herrschten wie heute am Mittelmeer: Das Wasser an der Oberfläche war bis zu 24 Grad Celsius warm. Dieser Wert liegt um mindestens 15 Grad über den bisherigen Schätzungen.

Einzeller als Temperatursonden

Zur Temperaturbestimmung nutzten die Forscher eine neue Methode. Als Thermometer dienen dabei Fettstoffe in den Zellwänden von einzelligen Organismen aus der Gruppe der Crenarchaeota, die zu den – früher Urbakterien genannten – Archaea gehören. Zu Temperaturfühlern macht sie eine ungewöhnliche Eigenschaft: Sie bauen in die Lipide ihrer Zellwand umso mehr Ringe aus fünf oder sechs Kohlenstoffatomen ein, je wärmer die Wassertemperatur ist. Damit passen sie, so die Vermutung, die mechanischen Eigenschaften und die Durchlässigkeit der Membran den Umgebungsbedingungen an.

Bei paläoklimatologischen Studien dienen sonst oft kalkhaltige Mikrofossilien – etwa Foraminiferen – zur Temperaturbestimmung. Diese waren im Bohrkern vom Lomonossow-Rücken jedoch rar. Daraus schließen die Forscher um Sluijs, dass die tieferen Wasserschichten kaum Sauerstoff enthielten; denn Foraminiferen brauchen das gelöste Gas zum Überleben. Mit der Wärme an der Wasseroberfläche ist der Sauerstoffmangel in der Tiefe sehr gut vereinbar.

Die gemessenen Badewassertemperaturen lassen sich mit Computermodellen des Klimas allerdings noch nicht rekonstruieren. Als mögliche Erklärung verweist das Team um Sluijs auf polare stratosphärische Wolken, die in Computersimulationen nicht berücksichtigt werden und die Troposphäre wärmen. Doch die Ursachenforschung dürfte die Klimatologen noch eine Weile beschäftigen.

Sluijs und seine Kollegen vermuten, dass das arktische Becken an der Schwelle vom Paläozän zum Eozän mit Brackwasser gefüllt war, das eine starke Schichtung aufwies: Die Wasserdichte nahm mit der Tiefe deutlich zu. Anders als derzeit gab es nur wenig Austausch mit den umgebenden Meeren. Die Situation glich somit derjenigen im heutigen Schwarzen Meer, das ebenfalls relativ salzarm ist.

Während des Eozäns wurde das Wasser am Nordpol noch süßer als zuvor. Das schließt ein Team um Henk Brinkhuis, ebenfalls von der Universität Utrecht, insbesondere aus dem massenhaften Fund von Sporen des Algenfarns *Azolla*. Dessen heutige Verwandte dienen oft als Zierpflanzen in Süßwasser-Aquarien.

Die Algenfarnzeit erreichte ihren Höhepunkt vor ungefähr 49 Millionen Jahren. Offenbar war das arktische Wasserbecken damals von den salzhaltigeren Meeren ringsum so gut wie abgeschnitten und im Sommer von *Azolla* bedeckt. Süßwasserzuflüsse ließen es anscheinend manchmal überlaufen. Ein Hinweis darauf sind Funde des Algenfarns auch in Sedimenten benachbarter Becken.

Vor 48,3 Millionen Jahren ging die Süßwasserperiode mit dem Eindringen salzigen, warmen Meerwassers zu Ende. In der Folge sanken die Temperaturen rapide: Schon 3 Millionen Jahre später gab es möglicherweise das erste Eis in der Arktis. Als Indiz dafür wertet das Team um Kathryn Moran von der Universität von Rhode Island in Narragansett ein einzelnes Steinchen im ansonsten feinkörnigen Sediment. Es könnte von einem Eisberg in das Meeresbecken verfrachtet worden sein, nachdem ein Gletscher das Gesteinsfragment an Land abgeschürft und zur Küste transportiert hatte, wo der Eisberg in See stach. Allerdings sind auch andere Mechanismen denkbar, wie das Steinchen in das Sediment gelangte – etwa per Treibholz oder durch Tiere.

Wenn sich Morans Deutung bestätigt, muss die Nordpolarregion ungefähr zur gleichen Zeit vereist sein wie die Antarktis. Bislang hatten Klimaforscher angenommen, dass die ersten Eisschollen frühestens vor 10 Millionen Jahren in der Arktis schwammen. Allerdings spricht angesichts global wirkender Klimaprozesse einiges dafür, dass die Pole tatsächlich synchron abkühlten. Das würde auch gut zu neuen Resultaten eines internationalen Teams um Jörg Schäfer vom Lamont-Doherty Observatory in Palisades (New York) über das Ende der jüngsten Eiszeit passen. Deren kälteste Phase vor 18000 Jahren klang demnach in den mittleren Breiten auf der Nord- und Südhalbkugel ebenfalls gleichzeitig ab *(Science, Bd. 312, S. 1510)*.

Klimaschwankungen haben viele Ursachen. Die Eiszeiten der letzten Jahrmillion wurden wohl durch periodische Änderungen der Erdbahn ausgelöst und durch Schwankungen der Treibhausgaskonzentrationen verstärkt. Vor 50 Millionen Jahren hingegen dürften es primär diese Gase gewesen sein, deren Schwund das Treibhaus in eine Kühltruhe verwandelte. Doch viele Details liegen noch im Dunkeln. Bis das Klima – sowie die Flora und Fauna – der ferneren Vergangenheit wirklich verstanden ist, dürften sich noch einige Sedimentschichten in den Ozeanen ablagern.

Sven Titz ist promovierter Meteorologe und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

ASTRONOMIE

Prager Planetensturz

Ende August beschloss die Internationale Astronomische Union auf ihrer Generalversammlung in der tschechischen Hauptstadt, Pluto den Planetenstatus abzuerkennen – Konsequenz einer Neudefinition der Körper im Sonnensystem.

Von Götz Hoeppe

Machen sich Wissenschaftler daran, Begriffe neu zu definieren, die selbst für Kinder alltäglich sind, ist ihnen öffentliches Interesse und Misstrauen sicher – vor allem, wenn es dabei prominente Opfer gibt. Was der Kommission für deutsche Rechtschreibung längst schmerzvoll bewusst ist, erfuhren nun auch Mitglieder des weltgrößten Astronomenverbands, als sie versuchten, auf eine einfache Frage eine sinnvolle und verständliche Antwort zu geben: Was ist ein Planet?

Seit ihrer Gründung im Jahr 1919 bemüht sich die Internationale Astrono-

mische Union (IAU) darum, Ordnung in unser Bild des Weltalls zu bringen. Sie definiert Fachbegriffe, benennt Himmelsobjekte und regelt die Grenzen zwischen den Sternbildern. Auch über eine neue Planetendefinition zerbrachen sich ihre Mitglieder bereits die Köpfe.

Im Jahr 1995 hatten zwei Forschergruppen so genannte Braune Zwerge identifiziert, Grenzgänger zwischen Sternen und gasförmigen Riesenplaneten wie Jupiter und Saturn. Im Gegensatz zu Planeten setzen Sterne als »Fusoren« durch die Kernverschmelzung Energie frei, und weil Braune Zwerge zumindest zeitweilig Deuterium in Helium verwandeln, gehören sie in diese Klasse (siehe SdW 5/2006, S. 42). Planeten sind dagegen »Nicht-Fusoren, die Fusoren umlaufen«. Sowohl die 1993 um einen Neutronenstern gefundenen Pulsar-Planeten als auch die seit 1995 entdeckten extrasolaren Planeten sind damit eindeutig klassifiziert.

War damit die obere Grenze des planetaren Massenspektrums definiert, blieb die Frage nach einer Mindestgröße für Planeten weiterhin ungeklärt. Sie stellte sich, als Mike Brown, Chad Trujillo und David Rabinowitz vom California Institute for Technology die Entdeckung eines etwa 2400 Kilometer großen Himmelskörpers im äußeren Sonnensystems bekannt gaben, der die Sonne alle 557 Jahre umläuft. Vorläufig wurde das Objekt 2003 UB_{313} benannt, inoffiziell hieß es bald Xena.

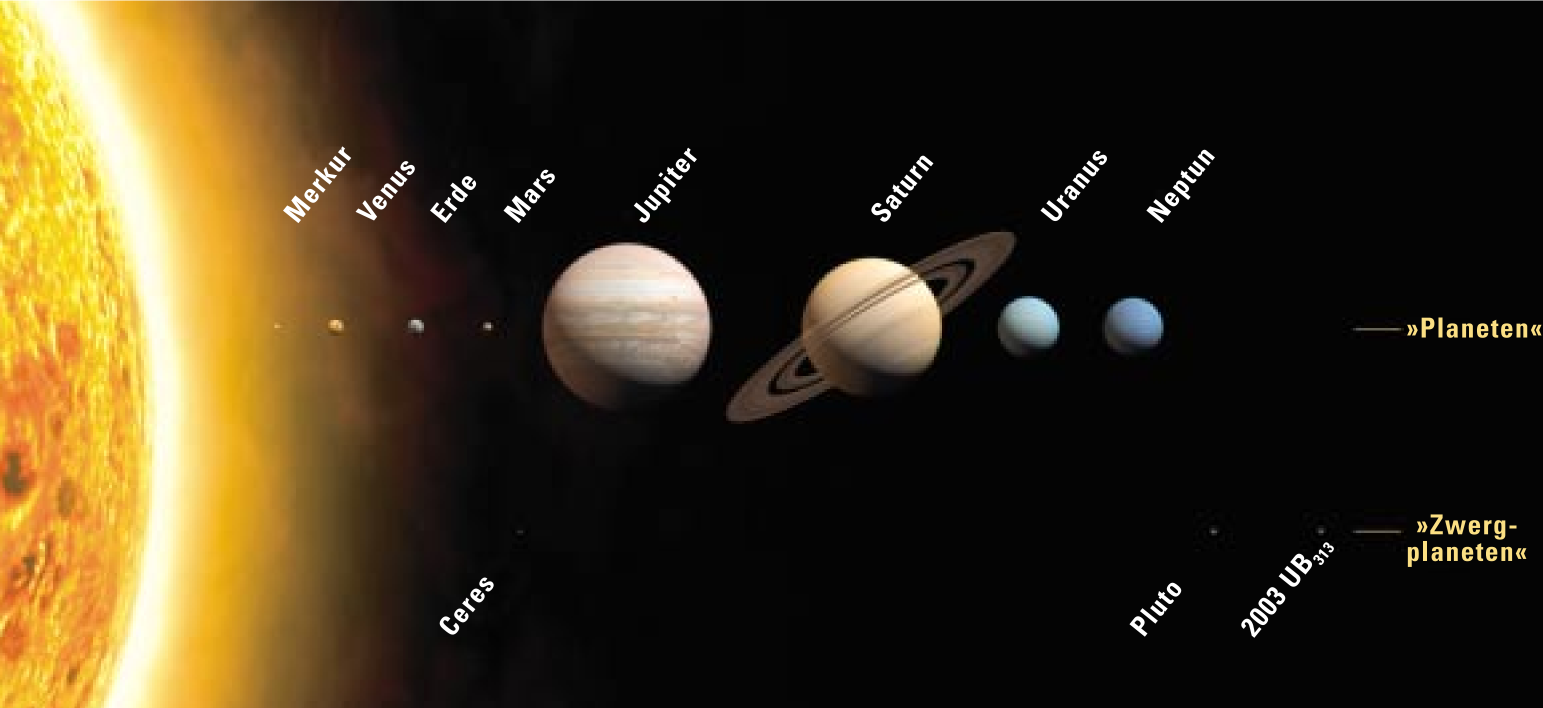
Schon seit 1992 hatten Astronomen im äußeren Sonnensystem Hunderte kleinerer Körper gefunden, für die sich bald der Sammelname Transneptun-Objekte durchsetzte, doch erst mit Xena kannte man eines, das größer als ein etablierter Planet ist – der 1930 entdeckte Pluto ist mit seinem Durchmesser von 2300 Kilometer geringfügig kleiner.

Suche nach Präzision und sozialer Akzeptanz

Dass die Existenz der Transneptune Plutos Planetenstatus in Frage stellen würde, konnte schon nach der Entdeckung von Varuna (Durchmesser: etwa 900 Kilometer; aufgespürt im Jahr 2001), Quaoar (1250 Kilometer; 2002) und Sedna (1600 Kilometer; 2004) nicht überraschen. Die IAU reagierte im Jahr 2003 und berief 19 Planetenforscher in ein Komitee, das bis zur nächsten Versammlung in Prag einen Vorschlag für eine neue Planetendefinition erarbeiten sollte.

Als sich nach zwei Jahren keine Einigung abzeichnete, löste der IAU-Präsident Ronald Ekers von der Australia Telescope National Facility die Runde auf und setzte ein kleineres Komitee ein, das nicht nur aus Spezialisten bestand – in der Hoffnung, auf diese Weise schneller zu einer Lösung zu kommen und auch »die sozialen Auswirkungen einer neuen Planetendefinition« im Blick zu behalten; denn schließlich sollte diese langfristig in Schulbücher aufgenommen werden. Das Komitee musste den Spagat zwischen wissenschaftlicher Präzision und einfacher Verständlichkeit meistern und eine Konvention vorschlagen, die sich durchsetzt, weil sie einleuchtet, und nicht allein, weil sie vorgeschrieben ist. Da die IAU über keine exekutive Gewalt verfügt, blieb ihr nichts anderes übrig.

Zu den sieben Mitgliedern des Komitees gehörten führende Planetenforscher wie Iwan Williams von der Queen Mary University in London, Junichi Watanabe als Pressesprecher des Nationalen Astronomischen Observatoriums von Japan und der Astronomie-Historiker Owen Gingerich von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) – außerdem die Autorin Dava Sobel, die ▷





ABSTIMMUNG: IAU / LARS HOLM NIELSEN; OBEN: IAU / MARTIN KORNMESSER

Der Internationalen Astronomischen Union (links bei der Tagung in Prag) zufolge sind in unserem Sonnensystem derzeit nur acht Planeten bekannt. Damit fiel ihrem Schiedsspruch nicht nur Pluto zum Opfer, sondern auch der altbekannte Merkspruch »Mein Vater erklärte mir jeden Sonntag unsere neun Planeten«, in dem jeder Anfangsbuchstabe für den eines Planeten stand. Hermann Gottschewski aus Tokio schlug der Redaktion von *Spiegel Online* folgenden Ersatz vor: »Mit Vorsatz entwendeten Medienrummel jagende Sternforscher unseren Neunten!«

▷ mit wissenschaftshistorischen Büchern wie »Längengrad«, »Galileos Tochter« und »Die Planeten« bekannt wurde.

Wie in der heutigen Astronomie üblich, sollte die Definition physikalisch motiviert sein. Doch woran sollte man sich orientieren, am Abstand zur Sonne, der Umlaufperiode, Bahnebene, Masse oder Form des Planetenkörpers? Jedes dieser Kriterien erscheint mehr oder weniger willkürlich. Als sich die Mitglieder des Komitees Ende Juni 2006 in der Pariser Sternwarte trafen, einigten sie sich schnell auf zwei Grundsätze: Planeten sollen rund sein und einen Stern umlaufen, ohne selbst ein Stern oder Begleiter eines Planeten zu sein.

Kugeln statt Kartoffeln

Rund sind Himmelskörper, wenn die Eigengravitation ihre Form bestimmt und sich in ihnen überall die Schwere der äußeren Schichten und der Druck des Inneren die Waage halten (hydrostatisches Gleichgewicht). Kleinkörper des Sonnensystems wie Kometen und die meisten Asteroiden scheiden als Planeten aus, denn sie haben unregelmäßige Formen und erinnern Astronomen häufig an Kartoffeln. Erst ab einem Durchmesser von 800 Kilometern sind sie einigermaßen kugelförmig.

Gemäß dieser Definition behalten alle neun im Volksmund bekannten Planeten ihren Status bei, also Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun und Pluto. Doch weitere Objekte kämen hinzu, und zwar neben einigen Transneptunen auch der bereits 1801 entdeckte Kleinplanet Ceres, der die Sonne zwischen Mars und Jupiter umläuft.

Um die Flut der Kandidaten einzuschränken, ergänzte das Komitee die Definition durch ein historisches Ausschlusskriterium: Allein Objekte, die bis zum Jahr 1900 entdeckt wurden, sollten als »klassische Planeten« gelten. Während der 1930 entdeckte Pluto aus dieser Kategorie hinausfiele, wäre Ceres eine Klasse aufgestiegen. Als Entschädigung für seine verlorene Ehre sollte Pluto fortan als Prototyp der »Plutone« gelten, zu denen auch die größeren, also runden, Transneptune zu zählen seien. Die verbleibenden Nichtplaneten auf Umlaufbahnen um die Sonne seien als Kleinkörper des Sonnensystems zu bezeichnen.

Gleich zu Beginn der Prager Generalversammlung am 16. August veröffentlichte das Planetendefinitions-Komitee seinen Resolutionstext und löste damit eine weltweite Nachrichtenlawine aus, die den planetaren Zuwachs verkündete. Doch die Reporter hatten die Streitfreudigkeit der Astronomen unterschätzt, die diese im Lauf der folgenden Woche auslebten. Manche beklagten, die Definition sei zu kompliziert. So bedauerte Leo Blitz von der Universität von Kalifornien in Berkeley, er könne seinem sechsjährigen Sohn nun nicht mehr erklären, was ein Planet sei, denn dafür setze die Neudefinition zu viel Wissen voraus. Andere, wie David Nesvorny vom South-West Research Institute in Boulder (Colorado), zeigten spitzfindig deren Schwächen auf. Computersimulationen zufolge räumten entstehende Planeten ihre Umlaufbahn von kleineren Gesteinsbrocken frei. Erst wenn sie diesen Bereich dominierten, könne man von einem Planeten reden.

Über das willkürliche Entdeckungsdatum gewann die Bedingung, ein Planet müsse seine Umlaufbahn freigeräumt

haben, die Oberhand und ersetzte dieses in der überarbeiteten Resolution, die nur für das Sonnensystem und nicht für andere Planetensysteme gelten sollte. Da Pluto letztere Bedingung nicht erfüllt, sei er aus dem Klub der Planeten zu verbannen, eigne sich jedoch als Prototyp der »Zwergplaneten« *(dwarf planets)*. Ob dieser Vorschlag mehrheitsfähig wäre, war bis zuletzt offen.

Als sich die Astronomen am Nachmittag des 24. August in der Prager Kongresshalle versammelten, drohte ihnen eine Blamage: Würden sie vor den Augen der Weltöffentlichkeit daran scheitern, sich darauf zu einigen, was die nach Sonne, Mond und Sternen wohl bekannteste Kategorie von Himmelsobjekten ausmacht?

Doch am Schluss ging alles gut: Nach einer hitzigen Diskussion wurde die überarbeitete Resolution mit den Stimmen von zwei Dritteln der 474 an der Abstimmung beteiligten Gelehrten angenommen, nicht jedoch der Vorschlag, Pluto und seine Kollegen zukünftig »plutonische Objekte« zu nennen. Vorerst ungeklärt bleibt zudem, was Planeten um andere Sterne ausmacht. Um darüber genauer nachzudenken, haben die Astronomen weitere drei Jahre Zeit – bis zur nächsten Generalversammlung in Rio de Janeiro.

Götz Hoeppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

PHYSIK

Geblitzt: Elektronen in der Radarfalle

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Georg Ohm ermittelte den Zusammenhang zwischen Stromstärke und Spannung einst rein empirisch, ohne die Träger des Stroms – die Elektronen – selbst zu kennen. Dass auch diese seinem berühmten Gesetz folgen, konnten erst jetzt Karlsruher Forscher zeigen.

Um die Bewegung von Elektronen in einem Leiter zu messen, nutzten Physiker von der Universität Karlsruhe aus, dass die Teilchen, wenn sie in einem Magnetfeld zur Seite gekippt werden, wie ein Kreisel präzedieren und elektromagnetische Strahlung aussenden. Die Geschwindigkeit der Präzession – und damit die Frequenz der Strahlung – steigt mit der Feldstärke. Die Forscher umgaben den Leiter daher mit einem inhomogenen Magnetfeld. Ein wanderndes Elektron verriet sich so durch eine Änderung in der Frequenz der von ihm ausgesandten Strahlung.

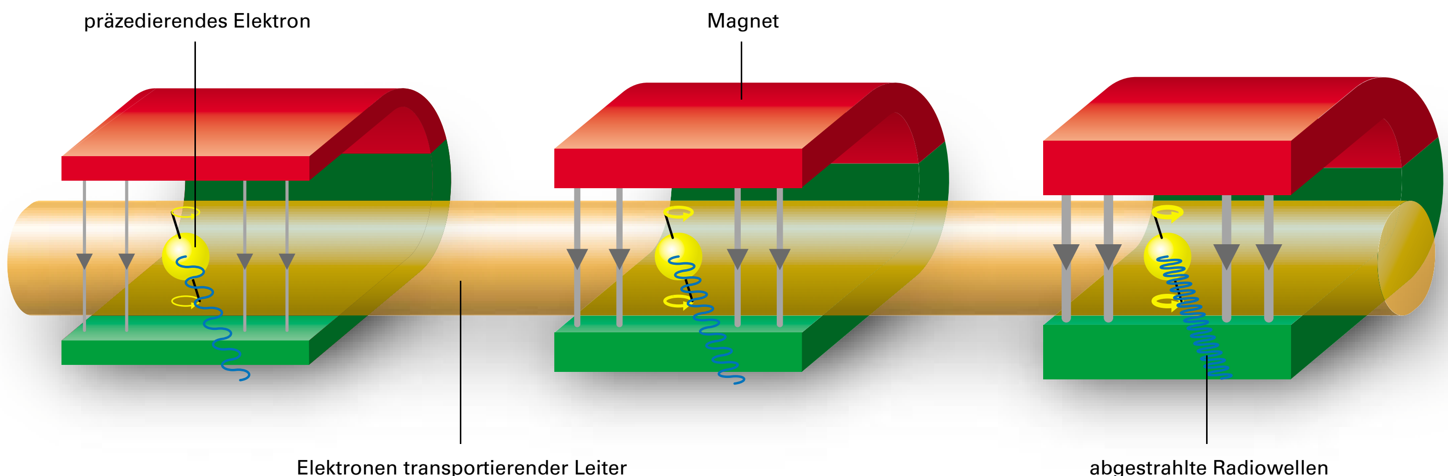
Von Stefan Maier

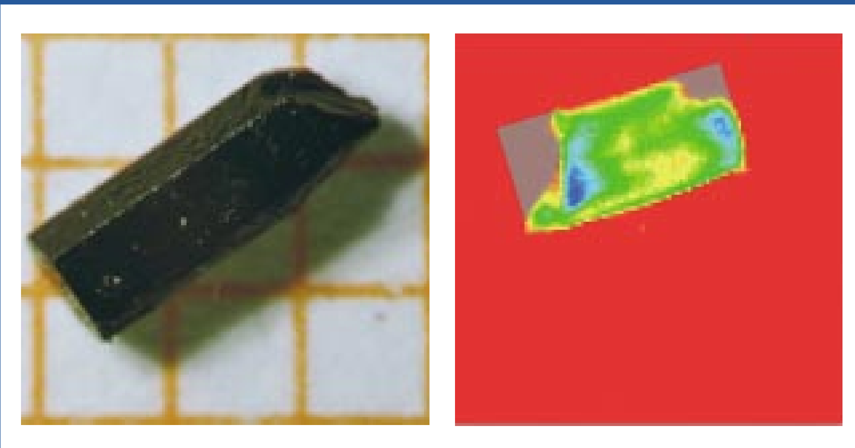
Ob sie sich einen Kindheitstraum verwirklicht haben, sei dahingestellt. Fest steht nur, dass Malte Drescher und Elmar Dormann von der Universität Karlsruhe zusammen mit Noam Kaplan von der Hebräischen Universität in Jerusalem letzthin Verkehrspolizisten spielten. Dazu hatten sie in ihrem Labor eine Radarfalle aufgestellt – Marke Eigenbau, wohlgemerkt, und nicht von der Polizeiwache ausgeliehen.

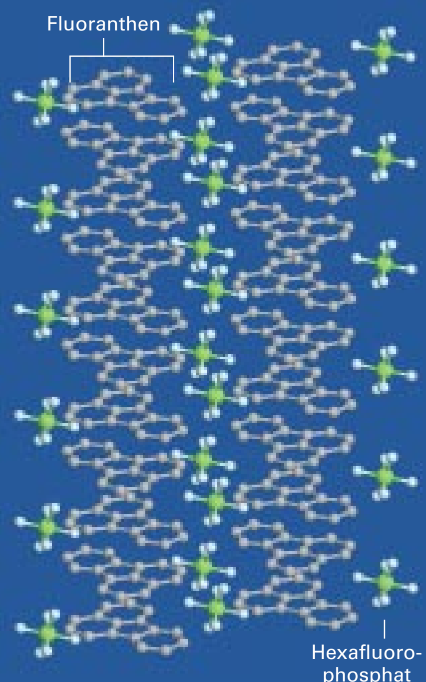
Knöllchen konnten die Forscher allerdings keine verteilen – nicht nur von Gesetzes wegen, sondern auch auf Grund der Natur der geblitzten Raser. Es handelte sich nämlich nicht etwa um Personen, die schneller durchs Labor rannten, als die Polizei erlaubt, sondern um Leitungselektronen in metallähnlichen Festkörpern. Dormann und seine Mitarbeiter maßen mit ihrer Apparatur die Geschwindigkeit dieser Teilchen beim Stromfluss *(Physical Review Letters, Bd. 96, Artikel 037601)*. So wollten sie prüfen, ob das bekannte Ohm'sche Gesetz auch für einzelne Elektronen gilt. An sich sagt es ja nur aus, dass die Stromstärke insgesamt proportional zur angelegten Spannung ist.

Wie aber verhalten sich die Elektronen, aus denen der Strom besteht? Nimmt die Geschwindigkeit, mit der sie durch den Leiter wandern, gleichfalls mit der Spannung zu?

Das wollten die Karlsruher Physiker herausfinden. Dazu mussten sie allerdings erst einmal eine Methode entwickeln, um die Geschwindigkeit der Elektronen direkt zu messen – eine mikroskopische Radarfalle eben. Glücklicherweise konnten sie dabei auf eine Variante der Magnetresonanztomografie zurückgrei- ▷







Als elektrischer Leiter diente ein Stab aus einer speziellen organischen Verbindung (oben links). Darin ist der polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoff Fluoranthen zu Stapeln übereinandergetürmt, die durch Ketten von Hexafluorophosphat getrennt sind (ganz rechts). Mit ihrer Apparatur konnten die Karlsruher Forscher die Spindichte im Leiter messen und farbcodiert abbilden (oben rechts).

LINKS: MALTE DRESCHER; MITTE: AUS: M. DRESCHER ET AL., PHYSICAL REVIEWS LETTERS 2006, BD. 96, NO. 3; RECHTS: DOMINIK STÖFFLER

fen, die schon seit Längerem etwa in der medizinischen Forschung dazu dient, den Blutfluss im menschlichen Adernsystem zu messen. Das Verfahren beruht auf den Kernspins fließender Moleküle, und da Elektronen ja auch einen Spin haben, sollte es mit ihnen prinzipiell genauso funktionieren.

Elektronen drehen Pirouetten

Spins gehören zu jenen Eigenschaften der atomaren Welt, die man am besten einfach als gegeben hinnimmt, ohne genau nachzufragen, was das denn bitte schön sei. In die Formeln der Quantenmechanik gestopft, beschreiben sie die Tatsache, dass subatomare Teilchen sowohl ein Drehmoment haben als auch magnetische Kräfte aufeinander ausüben können. Somit gleichen sie in gewisser Weise einerseits Miniaturkreiseln und andererseits winzigen Stabmagneten mit Nord- und Südpol.

Die Elektronen eines Leiters spüren folglich ein äußeres Magnetfeld und richten ihre Spinachse parallel zu diesem aus. Wird diese Achse gekippt, beginnt sie um die Feldlinien zu »präzedieren«. Diese Bewegung gleicht dem Taumeln eines rotierenden Kinderkreisels, wenn man ihn seitlich anstößt.

Elektronenspins kann man natürlich nicht einfach mit der Hand schubsen, wohl aber mit einem kurzen Strahlungsblitz im Mikrowellenbereich. Desgleichen lässt sich das Taumeln nicht mit bloßem Auge erfassen, sondern nur durch Radiowellen, welche die präzedierenden Elektronen aussenden. Die Frequenz dieser Strahlung hängt dabei von der Stärke des Magnetfelds ab.

Dies machten sich die Forscher bei ihrer Radarfalle zu Nutze. Der Trick bestand darin, dass sie den Leiter einem ungleichförmigen Magnetfeld aussetzten, dessen Intensität vom einen Ende zum anderen hin anstieg. Elektronen an verschiedenen Orten strahlten je nach der lokalen Feldstärke beim Präzedieren somit Radiowellen unterschiedlicher Frequenzen aus.

Stellen Sie sich nun vor, dass eines von ihnen von einer Stelle zu einer anderen wanderte. Dabei geriet es in ein stärkeres oder schwächeres Magnetfeld und strahlte entsprechend bei einer anderen Frequenz. Daraus sollte sich im Prinzip die zurückgelegte Strecke und in Verbindung mit der verstrichenen Zeit auch die Wanderungsgeschwindigkeit berechnen lassen.

In der Realität hatten es die Forscher jedoch nicht nur mit einem einzelnen Elektron zu tun, sondern mit unvorstellbar vielen, die sich mit unterschiedlichem Tempo in die verschiedensten Richtungen bewegten. Ihre Signale überlagerten sich folglich zu einem chaotischen Durcheinander, das unmöglich zu entwirren war.

Auf den ersten Blick schien das Verfahren damit zum Scheitern verurteilt. Doch gibt es einen eleganten Ausweg, mit dem die Karlsruher Forschergruppe doch noch zum Erfolg kam: Sie ließ ihre Radarfalle zweimal zuschnappen.

Der erste Puls diente dabei dazu, die Spins aller Elektronen des Leiters gleichzeitig in dieselbe Richtung – sagen wir aus der Vertikalen nach links – zu kippen. Wie Eisläufer, die im selben Moment in der gleichen Ausgangsposition eine Pirouette beginnen, fingen die kleinen Stabmagneten daraufhin zu taumeln an, wobei ihre Spitzen kleine horizontale Kreise beschrieben.

Das geschah anfangs synchron: Die Spins zeigten zu jeder Zeit alle in dieselbe Richtung. Da die Elektronen an den verschiedenen Orten aber unterschiedlich schnell präzedierten, gerieten sie schon nach Bruchteilen einer Sekunde aus dem Takt. Wie die Arme von zwei Eisläufern, die sich bei einer Pirouette unterschiedlich schnell drehen, nach einer Weile in verschiedene Richtungen weisen, so herrschte bald auch ein Chaos unter den Spins: Jeder hatte eine andere Orientierung.

In dieser Situation gaben die Karlsruher Forscher den Elektronen mit dem zweiten Puls einen erneuten Stoß. Er erfolgte jedoch gleichsam von der anderen Seite und kippte die Stabmagnete um 180 Grad. Dadurch machten sie auf der

Stelle kehrt und begannen – mit vertauschtem Nord- und Südpol – nunmehr in die entgegengesetzte Richtung zu kreiseln.

Ahnen Sie, was passierte? Das System entwickelte sich spiegelbildlich zu dem bisherigen Geschehen – wie ein Film, der rückwärtsläuft. Spins, die vorher schneller in die eine Richtung gekreiselt waren, taumelten nun auch schneller in die andere. Dadurch verringerten sie den Abstand zu den hinter ihnen zurückgebliebenen Bummlern wieder und schlossen schließlich zu ihnen auf.

Nach einer Zeit, die genau dem Intervall zwischen den beiden Pulsen entsprach, war so erneut der Anfangszustand erreicht, in dem die Spins allesamt nach links zeigten und sich kurzfristig im Gleichtakt bewegten. Dadurch überlagerte sich ihre Strahlung konstruktiv zu einem starken Signal, das sich aus dem Untergrundrauschen heraushob – gleichsam dem Echo des ersten Impulses.

Das traf allerdings nur dann zu, wenn sämtliche Elektronen die ganze Zeit über an Ort und Stelle blieben. Nur in diesem Fall waren Vorwärts- und Rückwärtsdrehung für jeden taumelnden Spin gleich schnell. Wanderten die Elektronen dagegen unter dem Einfluss einer Spannung alle mit derselben Geschwindigkeit und gerieten so an einen Ort mit anderer Feldstärke, drehten sie sich nach dem zweiten Puls mit höherem oder niedrigerem Tempo zurück. Dadurch wiesen die Spins, wenn dann das Echo auftrat, nicht mehr nach links, sondern in eine andere Richtung. Diese Winkelabweichung – Physiker sprechen von Phasendifferenz – erlaubte Rückschlüsse auf die Geschwindigkeit der Teilchen.

Zerfließendes Echo

In Wahrheit war die Situation allerdings noch komplizierter: Die Elektronen wanderten nicht alle mit dem gleichen Tempo, sondern verschieden schnell durch das inhomogene Magnetfeld. Die Differenz zwischen der Kreiselgeschwindigkeit in der Vorwärts- und Rückwärtsrichtung war dadurch nicht bei allen gleich. Als Folge davon ließ sich der Zustand, in dem sie sich völlig synchron bewegten, nicht mehr perfekt wiederherstellen. Er zerfloss gewissermaßen. Entsprechend war auch das Echosignal breiter und weniger hoch. ▷

▷ Indem die Karlsruher Forscher die Struktur dieses Signals analysierten, konnten sie daher sowohl die mittlere Geschwindigkeit der Elektronen als auch deren Variationsbreite bestimmen.

Tatsächlich galt es weitere Feinheiten zu berücksichtigen. So erzeugten die fließenden Elektronen selbst ein Magnetfeld zunächst unbekannter Stärke, das sich mit dem von außen angelegten überlagerte. Das Team um Dormann musste das Ausmaß dieses Störeffekts ermitteln und berücksichtigen – keine leichte Aufgabe. Doch die Mühe lohnte; denn das Ergebnis entsprach voll und ganz der Erwartung: Die Elektronen wanderten im Mittel umso schneller, je höher die angelegte Spannung und damit die Stromstärke war.

Ohm hatte – natürlich – Recht!

Im Ernst hatten die Karlsruher Wissenschaftler ja auch nicht wirklich bezweifelt, dass das Ohm'sche Gesetz genauso für die Bewegung der Elektronen selbst gelten würde; denn anders ließe es sich gar nicht erklären. Doch getreu der Maxime »Probieren geht über Studieren« machten sie den Test trotzdem. Außerdem bot er die Gelegenheit, ein Messprinzip zu erproben, das sich auch für andere Zwecke eignet. Eine Radarfalle für Elektronen, die nicht nur deren Geschwindigkeit, sondern auch ihre Dichteverteilung bestimmt und sie in hübschen Bildchen festhält, hätte viele denkbare Anwendungen – zum Beispiel zur Untersuchung von Fehlstellen in Halbleitern.

Bis das gelingt, müssen die Forscher aber erst noch einen Weg finden, das Verfahren auf herkömmliche Materialien zu erweitern. In ihrem Experiment benutzten sie nämlich kein simples Metall, sondern einen exotischen organischen Leiter, der Säulen aus dem polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoff Fluoranthen enthält. Der Grund: Die Elektronenspins drehen darin besonders ausdauernd ihre Pirouetten. Selbst mit dieser Einschränkung und ohne die Aussicht auf baldige praktische Anwendungen aber bleibt ein Resultat, das seinen eigenen Reiz hat. Er liegt in der Erkenntnis, dass Ohm in einem tieferen Sinne Recht hatte, als er selbst ahnen konnte.

Stefan Maier ist Professor für Physik an der Universität Bath (Großbritannien).

Springers EINWÜRFE von Michael Springer



Ist der Kugelblitz nur ein Witz?

Wilde Theorien durchzucken Physikerhirne.

Das Leben ist ungerecht. Im Lauf der Jahrzehnte haben Tausende einen Kugelblitz erlebt – ich nicht. Wie gern sähe ich einen faust- bis kopfgroßen Lichtball (heiß oder kalt?) geisterhaft durchs geschlossene Fenster hereinschweben (das Fensterglas lädierend oder spurlos?), im Zimmer auf- und abschweben (lautlos oder leise brummend?) und wieder entschwinden (sanft oder mit einem Knall?).

So sehr die Berichte im Detail variieren, die Sichtungen sind wohl ernst zu nehmen. Nur: Was fängt die Wissenschaft mit einem Phänomen an, das für gründliches Beobachten zu flüchtig, für vernünftige Statistik zu selten ist?

Im holländischen Eindhoven kamen Mitte August Physiker aus aller Welt zum »9. Internationalen Symposium über Kugelblitze und unkonventionelle Plasmen« zusammen. Die Vortragsthemen geben einen Eindruck von einem Gebiet am Rande der normalen Wissenschaft. Wenn die Physik einem kunstvoll gewebten Teppich gleicht, dann hängen die Kugelblitzforscher daran wie die Fransen: fest verbunden, aber nicht ganz dicht verwoben.

Während ein belgisch-amerikanisches Physikerduo ein vibrierendes Plasmamodell vorrechnet, aus dem sich das gelegentlich gehörte Summen von Kugelblitzen zwanglos ergeben soll, lassen russische Experimente aus Hochspannungsentladungen unter Wasser tatsächlich kurzlebige Plasmakugeln in die Luft steigen. Andere Forscher greifen tollkühn zu extremeren Erklärungsmitteln.

So meint der griechische Physiker Philippos M. Papaelias von der Universität Athen, alles – auch ein eigenes Erlebnis – spräche für die Abkunft der Kugelblitze von winzigen Antimaterie-Meteoren. Die würden von Antimaterie-Galaxien in den Tiefen des Alls ausgehen, gelegentlich die Erde erreichen und im besten Fall zusammen mit einer Prise irdischer Materie unschädliche Leuchtkugeln bilden; im schlimmsten Fall könnten sie gleich die ganze Erde in einen Kugelblitz verwandeln.

Dagegen wirkt es geradezu stoisch, wenn ein anderer Vortrag sich dem Thema Gesundheitsgefährdung durch Kugelblitzstrahlung widmet. Drei Physiker aus Georgien wiederum finden, die einfachste Erklärung für das Phänomen sei ein Bose-Einstein-Kondensat, das sich bei Raumtemperatur als makroskopisches Quantenobjekt majestätisch durchs Zimmer wälzt. Ein rumänisches Physikerteam schließlich setzt auf wundersame Selbstorganisation: Der Plasmaballon sei ein komplexes System, das rundum Ordnung einsauge und sich, da lern- und erinnerungsfähig, erstaunlich selten an den Möbeln stoße.

Nachdem wir uns die billigen Lachtränen aus den Augen gewischt haben, sollten wir einräumen, dass aus dieser Zwielichtzone zwischen seriöser Plasmaphysik und Ufo-Sichtung durchaus eines Tages eine spektakuläre Entdeckung hervorkommen könnte. Wie schön das wäre: Ein Kugelblitzologe, sagen wir aus Usbekistan, präsentiert ein unkonventionelles Plasmamodell, das endlich die Kernfusion zu einer technisch beherrschbaren, wirtschaftlich tragbaren Energiequelle macht. Schlagartig wird die Menschheit alle Energiesorgen los, nie wieder Krieg um knappes Erdöl …



Sicher, nur ein Traum, so unwahrscheinlich wie die Chance, dass ich je einen Kugelblitz erlebe – aber ganz und gar unmöglich ist beides nicht.

Was Fischen Beine machte

Die ersten Vierfüßer hoben nur den Kopf zum Luftholen aus dem Wasser. Dazu stemmten sie sich hoch. Den Landgang wagten sie erst später.

Von Jennifer A. Clack

Zu den folgenreichsten Schritten in der Evolution irdischen Lebens gehörte die Verwandlung von Fischen in Landtiere. Aus Flossen tragenden Wesen entstanden vierbeinige Kreaturen – Tetrapoden – mit Fingern und Zehen. Ohne dieses Ereignis hätte die Welt bis heute völlig anders ausgesehen: Weder Dinosaurier, weder Frösche noch Vögel, Schlangen noch Säugetiere wären erschienen, natürlich auch nicht der Mensch. Manche Vertreter der Tetrapoden mögen ihre Gliedmaßen verloren oder umgebaut haben, doch ein ihnen gemeinsamer Vorfahre war mit vier Beinen ausgestattet. Zwei saßen vorn und zwei hinten – an Stellen, wo einmal Flossen geschlagen hatten.

Beine waren aber für den Landgang mitnichten das einzige neue Erfordernis. Für ein Leben außerhalb des Wassers brauchte es mehr neuartige Anpassungen: zum Atmen, zum Hören, um der Schwerkraft standzuhalten und zu vielem anderen. Doch als sie das alles einmal errungen hatten, lag den Tetrapoden das Land zu Füßen.

Noch vor gut fünfzehn Jahren wussten die Paläontologen kaum Genaueres über diese Evolution, vor allem nicht über die Einzelschritte. Nur so viel stand fest: Die Vierfüßer hatten sich aus bestimmten Fischen, den Fleischflossern, entwickelt, zu denen die Lungenfische und Quastenflosser gehören. Schon Ende des 19. Jahrhunderts hatte das der amerikanische Paläontologe Edward D. Cope vermutet. Wann das Ereignis stattgefunden hatte, ob irgendwann im Devon oder gleich danach, war recht unsicher. Die Schätzungen reichten von vor 400 bis vor 350 Millionen Jahren. Für präzisere Aussagen fehlten die Fossilien. Denn die Forscher kannten lange nur einen passenden Fisch, den ausgestorbenen Quastenflosser *Eusthenopteron*, und einen einzigen Tetrapoden aus dem Devon, nämlich *Ichthyostega*, einen »Fischschädellurch« (siehe Bild S. 29). Dieser »Lurch« war jedoch schon zu sehr Vierfüßer, als dass man von ihm über die Vorgänge viel hätte herleiten können.

Die frühen Modelle zu dieser Evolution waren darum recht spekulativ. Am bekanntesten wurde das Szenario, welches der Wirbeltierpaläontologe Alfred Sherwood Romer von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) in den 1950er Jahren entwarf. Danach schleppten sich Fische ähnlich dem Quastenflosser *Eusthenopteron* mit ihren muskulösen Flossen zu einem besseren Gewässer, wenn ihr altes auszutrocknen drohte. Auf Dauer gesehen, nahm Romer an, hatte in Trockenzeiten einen Selektionsvorteil, wer mehr Strecke über Land bewältigte, denn der konnte die


RAÚL MARTÍN

Der frühe Vierfüßer *Acanthostega* konnte mit seinen Beinen nicht laufen. Die Tiere stemmten sich wahrscheinlich im warmen Flachwasser hoch, um Luft zu schnappen.



letzten Wasserstellen noch erreichen. Dieser Selektionsdruck sollte schließlich die Beine hervorgebracht haben. Nach Romers Modell verließen Fische zuerst das Wasser, dann erst evolvierten Beine.

Dieses Bild stimmt heute nicht mehr, denn zahlreiche neue Fossilien zeigen den Übergang vom Wasser aufs Land ganz anders. Auch sonst ist das Wissen über die Evolution der frühen Tetrapoden erheblich angewachsen. Viele der alten Vorstellungen über Vielfalt, Verbreitung und ökologische Einnischung der ersten Landwirbeltiere und ihrer Vorgänger müssen von Grund auf korrigiert werden.

Rätselhafter früher Vierbeiner im Flachwasser

Wichtig sind für das Verständnis unter anderem Fossilien der Gattung *Acanthostega*, eines der frühesten Tetrapoden (siehe Bild links). Diese Versteinerungen gehörten zu den ersten, die uns dazu veranlassten, das Bild der Evolution der frühen Landwirbeltiere zu revidieren. *Acanthostega* lebte vor rund 360 Millionen Jahren im Gebiet des heutigen Ostgrönland. An sich hatte Erik Jarvik vom Schwedischen Naturhistorischen Museum in Stockholm diese Tiere schon 1952 anhand zweier unvollständiger Schädeldecken beschrieben. Erst 1987 aber fanden meine Kollegen und ich in Grönland auch Überreste von anderen Körperteilen.

Wie sich nun herausstellte, war *Acanthostega* anatomisch gesehen genau das gesuchte Zwischenwesen zwischen Fisch und voll entwickeltem Vierfüßer – nur dass es keineswegs so aussah wie erwartet. Dieses Tier besaß zwar schon Beine und Füße, war aber zum Landleben durchaus nicht gerüstet (siehe Kasten S. 27, mittleres Bild). Unter anderem hatte es noch keine richtigen Fußknöchel. Diese Beine, wohl eher noch Schwimmpaddel, konnten das Körpergewicht außerhalb des Wassers sicherlich nicht tragen. Lungen waren – neben Kiemen – zwar vorhanden, doch bei den kurzen Rippen, also ohne Brustkorb, wären sie an Land kollabiert. Zu vieles an *Acanthostega* war unverkennbar noch fischmäßig. Die Proportionen der Unterarmknochen etwa erinnerten noch stark an die Brustflossen des Quastenflossers *Eusthenopteron*. Tatsächlich trug das Tier auch einen hohen paddelförmigen, von langen Flossenstrahlen durchzogenen Schwanz. ▷

▷ Das alles war verblüffend. *Acanthostega*, eindeutig ein Tetrapode, wirkt wie ein Wassertier. Seine nächsten Vorfahren müssen noch durch und durch Fische gewesen sein, die das nasse Element nie verließen. Die Extremitäten dieses Geschöpfs waren ganz klar an den Aufenthalt im Wasser angepasst. War das etwa die typische Lebenssituation der ursprünglichen Tetrapoden?

Mit dem Kopf voran

Die neuen Befunde zwangen uns zum Umdenken. In welcher Reihenfolge hatten sich die einzelnen Körperteile bei der Umgestaltung zum Vierfüßer wirklich verändert? Anscheinend war nicht, wie Romer vermutet hatte, zuerst ein Fisch mit fleischigen Flossen aufs Trockene gekrochen, und dessen Nachfahren hatten allmählich Beine bekommen. Sondern Beine und Füße – somit die Tetrapoden – waren tatsächlich im Wasser entstanden. Erst später wurden diese Extremitäten so umgebaut, dass man damit gehen konnte. Wieso aber brauchte *Acanthostega* im Wasser Beine? Wenn der Hintergrund dieser Veränderung nicht der Zwang war, sich ans trockene Element anpassen zu müssen, welche Lebenserfordernisse, welche ökologischen Rahmenbedingungen, förderten diese Evolution dann?

Gern wird *Acanthostega* als »Missing Link« (das gesuchte Bindeglied) zwischen den Landwirbeltieren und ihren aquatischen Vorfahren angesehen. Mit mindestens einem seiner Merkmale passt das Tier in diese Rolle allerdings nicht. An jedem Fuß trug es acht gut ausgebildete Zehen – nicht fünf, wie es sich nach Ansicht der Forscher für einen ursprünglichen Tetrapoden gehört. Sie hatten immer geglaubt, dass sich der fünfzehige Fuß anatomisch direkt von Flossen herleitete. Normalerweise hätte man ein achtzehiges Tier als Kuriosität und Missbildung abgetan. Doch es gibt mehr solche unpassenden Funde. Skelettreste eines rätselhaften frühen Tetrapoden mit sechs Zehen, *Tulerpeton* getauft, waren schon früher in Russland entdeckt worden. Auch *Ichthyostega* trug offenbar mehr als fünf Zehen pro Fuß (siehe Bild S. 29). Das beweisen Fossilien dieses frühen »Lurchs«, die wir auf unserer Grönland-Expedition gleichfalls fanden.

Teilweise konnte die Entwicklungsgenetik dieses Rätsel lösen. Zu den Steuer- und Regulatorgenen, die an der Ausbildung von Flossen oder Gliedmaßen beteiligt sind, gehören welche der so genannten *Hox*-Gruppe sowie das Gen *sonic hedgehog*. Bei Flossen wie Gliedmaßen wirken im Grunde die gleichen Gene mit, aber sie haben unterschiedliche Aufgaben. So scheinen *Hoxd 11* und *Hoxd 13* bei den Vierfüßern eine prominentere Rolle zu spielen als bei den Fischen. In den Beinknospen sind sie in einem größeren Bezirk aktiv als in den Knospen von Flossen. Auch ist ihr Aktivitätsbereich verschoben, und genau dort bilden sich die Zehen aus. Wie also aus einem achtfingrigen Glied ein fünffingriges wurde, muss erst zukünftige Forschung erweisen. Zumindest glauben wir aber zu verstehen, warum die Landwirbeltiere als Grundmuster fünf Zehen aufweisen: Diese Zahl scheint günstig gewesen zu sein, um genügend stabile und dabei doch flexible Knöchel auszubilden, die das Körpergewicht aushalten und auch ein Ausschreiten erlauben.

Durch die *Acanthostega*-Fossilien wurden wir noch auf eine weitere, vorher wenig beachtete anatomische Eigenart früher Tetrapoden aufmerksam: den Zahnbesatz am Unterkiefer. Fische tragen dort üblicherweise zwei Reihen Zähne – in der äußeren Reihe eine Menge kleine und in der inneren neben einem Paar großer Fangzähne auch noch einige kleinere. Bei *Acanthostega* saßen in der Außenreihe eher wenige größere Zähne, während die Größe der Innenzähne zurückgenommen war. Vermutlich fraßen die Tiere nicht mehr nur im Wasser, sondern hielten öfter auch dabei mindestens den Kopf über Wasser.

Endlich gelang es nun, einige merkwürdige Fossilien einzuordnen, die teils seit Jahrzehnten in den Schubladen der Museen gelegen hatten. Zu den spektakulärsten davon gehört die Gattung *Ventastega* aus dem späten Devon. Schon 1933 war von ihr in Lettland ein Unterkiefer aufgetaucht. Jetzt wurde plötzlich klar, dass es sich um einen Tetrapoden handelt. Neue Grabungen an der ursprünglichen Fundstätte förderten mehr hervorragendes Material zu Tage, darunter einen fast vollständigen Schädel.

Die Luft machte Hals und Schultern frei

Zudem nahmen sich Paläontologen einige alte Funde von Fischen genauer vor, die wie Übergangsformen zwischen *Eusthenopteron* und *Acanthostega* wirken. Einmal ist da die Gattung *Panderichthys* aus dem Baltikum, 380 bis 375 Millionen Jahre alt, ein großer Fisch mit spitzer Schnauze und oben auf dem Kopf sitzenden Augen. Zum anderen betrifft es die 375 bis 370 Millionen Jahre alte Gattung *Elpistostege* aus Kanada. In Größe und Gestalt waren sich beide sehr ähnlich, und sie standen den Tetrapoden wesentlich näher als *Eusthenopteron*.

Eine sensationelle Entdeckung gelang im Jahr 2004 auf Ellesmere Island im arktischen Kanada. Die Expedition unter Leitung des Paläontologen Neil Shubin von der Universität Chicago förderte eine Reihe wunderbar erhaltener Fossilien eines Fischs zu Tage, der den frühen Tetrapoden noch stärker ähnelt als *Panderichthys* oder *Elpistostege*. Das Tier erhielt den Gattungsnamen *Tiktaalik*, »großer Flachwasserfisch« (siehe Kasten S. 28). Durch diese Funde gewinnen wir eine viel genauere Vorstellung vom Leben und Aussehen jener Fischgruppe, deren Nachfahren Tetrapodenmerkmale hervorbrachten.

Auch wie die Anpassung ans Landleben ablief, ist inzwischen deutlicher geworden. Die bisher bekannten Gattungen dokumentieren rund 20 Millionen Jahre der frühen Vierfüßerevolution (siehe Bild S. 30). Daher wissen wir:

IN KÜRZE

- Der **Auftritt von Landwirbeltieren** markiert einen Meilenstein in der Evolution des Lebens. Wie sie entstanden, erkennen Paläontologen erst jetzt genauer. Fossilfunde aus den letzten fünfzehn Jahren enthüllen immer mehr der Evolutionsschritte hin zu den **Tetrapoden** (**Vierfüßern**) und darüber hinaus zum eigentlichen Landgang.
- Diese Entwicklung verlief völlig anders als bisher vermutet. Viele **charakteristische Merkmale** der Landwirbeltiere entstanden bereits im Wasser, auch die Beine und die Luftatmung. Frühe Arten von Tetrapoden waren geografisch unerwartet weit gestreut. Sie waren **zahlreicher und vielfältiger** als früher angenommen, manche zudem ökologisch auffallend spezialisiert.

Nicht nur Beine entwickelten sich anfangs im Wasser, sondern interessanterweise begannen sich auch etliche andere entscheidende Merkmale der späteren Landtiere schon zu zeigen, während diese Geschöpfe noch vorwiegend im Wasser wohnten. Im Übrigen sieht es so aus, als ob gar nicht die Fortbewegung den Anfang machte, sondern die Atmung.

So kurios es klingt – der Anpassungsdruck, Luft atmen zu müssen, könnte den allmählichen Umbau von Schultergürtel und Brustflossen ausgelöst haben. Zunächst vermochten sich die Evolutionsbiologen einfach nicht vorzustellen, was Übergangsformen wie *Acanthostega* mit ihren unfertigen Beinen wohl anfingen. Nach heutiger Kenntnis verwandelten sich die rückwärts weisenden Brustflossen nach und nach in seitwärts gerichtete Gliedmaßen mit großen Muskelansätzen. Wir vermuten, dass diese ersten Beine immerhin schon genügten, um sich vorn hochzustemmen, damit der Kopf aus dem Wasser kam und das Tier nach Luft schnappen konnte (siehe Bild S. 24/25). Dabei halfen die Zehen das Gewicht besser zu verteilen.

Zu dieser These passt gut ein neuerer Fund, den Shubins Team an der Fossilstätte Red Hill in Pennsylvania machte. Es handelt sich um den 365 Millionen Jahre alten Oberarmknochen eines Tetrapoden. Aber an dessen oberem Ende saß anscheinend ein Scharniergelenk, nicht ein Kugelgelenk wie bei den Landwirbeltieren. Ausschreiten konnte das Tier hiermit sicherlich nicht, jedoch dürfte ihm zumindest möglich gewesen sein, sich zum Luftschnappen hochzudrücken. Vielleicht konnte es in dieser Stellung sogar auf Beute lauern. Dagegen enthielten die Flossen des Fischs *Tiktaalik* überraschenderweise Gelenke, die ihm wohl nicht nur Abstützen, sondern vielleicht auch eine Vorwärtsbewegung erlaubten.

Wer über dem Wasser nach Luft schnappen musste, benötigte wegen der Schwerkraft einen stabileren Schädel und Kiefer. Anatomisch änderte sich dadurch vieles. Zum Beispiel wurde die Schnauze länger (siehe Bilder unten). Die Zahl der Schädelknochen nahm ab, und die übrigen Teile verwuchsen fester. Am stärksten verschmolzen die Knochen am Hinterkopf – dort setzten die kräftigen Na- ▷

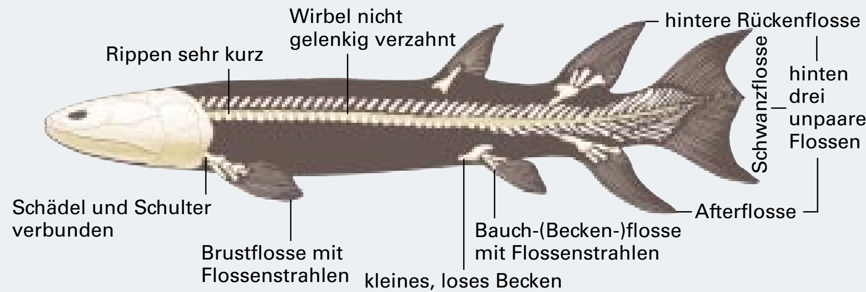


Schritte zum Landleben

Ein radikaler Umbau des Skeletts war nötig, als die Landwirbeltiere entstanden. Die Vorfahren gehörten zum Umfeld von Quastenflossern. Zwischenformen wie die Gattung *Acanthostega* lebten wahrscheinlich noch völlig im Wasser.

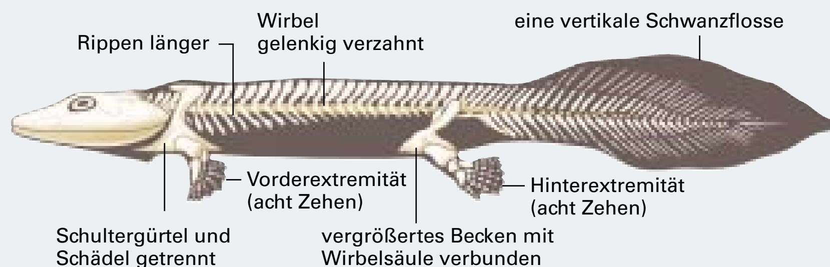
EUSTHENOPTERON
ausgestorbener Quastenflosser



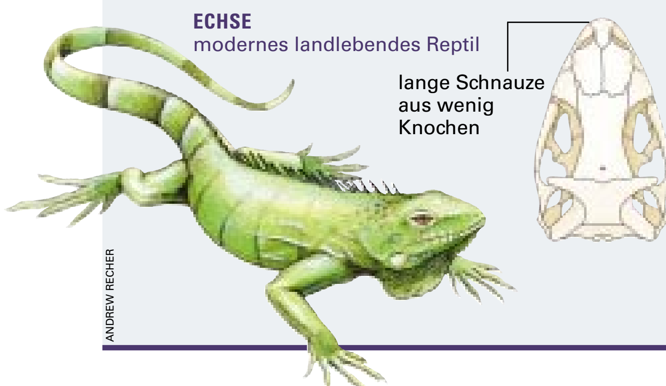


ACANTHOSTEGA
früher Tetrapode



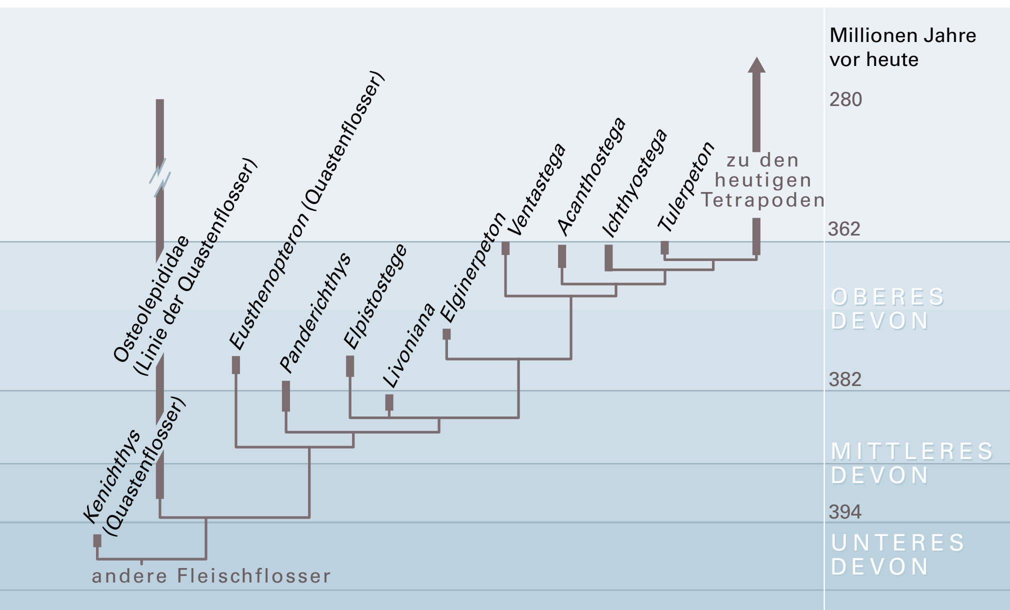


ECHSE
modernes landlebendes Reptil





ANDREW RECHER



LUCY READING-IKKANDA

Evolutionslinien unserer Urverwandtschaft: Die ersten Tetrapoden traten im frühen Oberen Devon auf. Zu ihrer unmittelbaren Stammgruppe im späten Mittleren Devon gehörten Quastenflosser wie *Eusthenopteron*. Die erst kürzlich entdeckte Gattung *Tiktaalik* ist in dieses Schema noch nicht eingetragen. Diese Übergangsform dürfte sich irgendwo zwischen *Panderichthys*/*Elpistostege* und *Acanthostega* einreihen.

***Ichthyostega* kroch auf dem Land wohl ähnlich wie Robben, lebte aber meist noch im Wasser. Bis zum Fund der neuen Gattung *Tiktaalik* war dies der älteste Tetrapode, der sich auch anders als schwimmend fortbewegen konnte.**

ckenmuskeln von der Wirbelsäule her an, die den Kopf anhoben. Auch der Unterkiefer gewann durch zusammenwachsende Knochen mehr Stabilität, was sicherlich die vermutete Kehlatmung erleichterte. Moderne Amphibien und Luft atmende Fische pressen oder schlucken die Luft aus dem Mundraum wie bei einem Blasebalg in die Lungen.

Oder entstand der starke, stabile Kiefer als Anpassung ans Fressen an Land? Die frühen Tetrapoden lebten allesamt räuberisch. Die Erwachsenen, bei den meisten Arten wenigstens um einen Meter lang, dürften damals draußen nicht recht satt geworden sein, denn dort gab es höchstens Insekten und dergleichen winziges Getier. Vielleicht war das aber für den Nachwuchs ein prima Futter. Möglich, dass die Jugend sich anfangs am weitesten aus dem Wasser wagte.

Auch am Kopfansatz tat sich einiges. Jene Knochen, die bei Fischen den Schädel mit dem Schultergürtel verbinden, verschwanden. Tetrapoden haben einen muskulösen Hals und frei beweglichen Kopf. Natürlich war auch ein gründlicher Umbau des Kiemensystems nötig. Manche von dessen Knochen wurden nun verzichtbar. Das Spritzloch aber – eine besondere Kiemenöffnung –, das zu einem luftgefüllten Sack in der Halsgegend führte, vergrößerte sich.

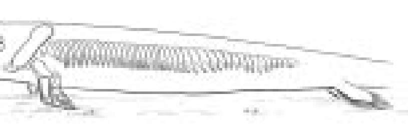
Haien eine Kopflänge voraus

Die große Frage ist, warum sich einige Fische plötzlich auf Luftatmung verlegten, nachdem diese so lange im Wasser gut zurechtgekommen waren. Wie wir wissen, lagerten die Fossilien, von denen hier die Rede ist, in Sedimenten flacher Gewässer. Wir vermuten, diese Tiere jagten im Seichten kleinere Fische. Vielleicht paarten sie sich auch im Flachwasser und legten dort ihre Eier. Alle bisher bekannten frühen Tetrapoden und Fast-Tetrapoden besaßen nämlich – wie auch Krokodile – einen auffallend flachen Schädel. In dem Zusammenhang sei die Ausbreitung der Gefäßpflanzen erwähnt, die im Devon die Landschaften veränderten. Zum ersten Mal gab es Pflanzen, die Laub abwarfen. Kleine Tiere fanden so im Uferbereich neue Verstecke, wohin große Raubfische alter Art ihnen nicht folgen konnten. Einige räuberische Fleischflosser aber ließen die Konkurrenz hinter sich. Und weil seichtes Wasser oft warm und dann sauerstoffärmer ist, gewöhnten sie sich an, über Wasser nach Luft zu schnappen. Wohl eher ein glücklicher Umstand mag es gewesen sein, dass ihnen die neuen Merkmale später zur Eroberung des Landes verhalfen.

Neues Bindeglied

Hoch im Norden Kanadas, auf Ellesmere Island, gräbt ein Team um Edward B. Daeschler von der Naturwissenschaftlichen Akademie in Philadelphia (Pennsylvania) und Neil H. Shubin von der Universität Chicago seit 2004 Fossilien eines Fleischflossers aus, der den ersten Tetrapoden näher stehen könnte als bisher jeder andere Fisch dieser Gruppe. Hierauf hin deuten der Kopf, die Ohr- und Schulterregion, aber etwa auch die verlängerten, sich überlagernden Rippen. Dieser über einen Meter lange Fisch lebte im niedrigen Süßwasser, weswegen die Gattung nach der lokalen Eskimosprache »Tiktaalik« genannt wurde. Er hatte schon einen beweglichen Kopf und eher flachen Rumpf. Auf seine starken Vorderflossen konnte er vermutlich sein Gewicht stützen und auf seinen Flossen gehen. Anstatt Fingern besaß er aber noch Flossenstrahlen. Dieser Fisch hielt sich vermutlich nicht nur im Flachwasser, sondern wohl auch zumindest an dessen Rand auf. Zwar besaß auch er noch Kiemen, doch scheint das Atmen von Luft schon ziemlich ausgeprägt gewesen zu sein. *(Quelle: Nature, Bd. 440, 6. April 2006, S. 747, 757 und 764)*

Von Adelheid Stahnke, Redakteurin bei Spektrum der Wissenschaft



KALLIOPI MONOYIOS

***Tiktaalik roseae*, ein tropischer Flachwasserfisch aus dem frühen Oberen Devon. Allein sein Kopf war zwanzig Zentimeter lang.**



RAÚL MARTÍN

So wichtig die verschiedenen Neuerungen rund um das Atmen waren – Lungen und Beine allein machten die Tetrapoden noch lange nicht landtauglich. Zum Beispiel musste die Ohrregion umgebaut werden. Schon bei dem tetrapodennahen Fisch *Panderichthys*, und noch ausgeprägter bei der neuen Gattung *Tiktaalik*, ist der Schädel hinter (über) den Augen wegen des veränderten Innenohrs kürzer. Es scheint, als habe der Schweresinn wegen des Aufenthalts im Flachwasser mehr Bedeutung gewonnen. Die gleichzeitige Vergrößerung der Luftkammer im Rachenraum – wiederum bei *Tiktaalik* noch ausgeprägter als bei *Panderichthys* – könnte das Hören verbessert haben. Auch bei einigen heutigen Fischarten fängt der Luftsack Schallwellen auf, die dann über Knochen zum Innenohr geleitet werden.

Im Zusammenhang mit der Ohrregion veränderte sich natürlich das Kiemenskelett, denn offenbar wurde schon früh die Luftatmung immer wichtiger. Ein Knochen des zweiten Kiemenbogens, das *Hyomandibulare*, wurde später bei den Landwirbeltieren zu einem Gehörknöchelchen (dem *Stapes*, auch *Columella* genannt), das Schallwellen vom Trommelfell zum Innenohr überträgt und dabei verstärkt. (Dieser Knochen ist bei den Säugern zum Steigbügel im Mittelohr geworden; bei ihnen kamen zwei weitere Gehörknöchelchen hinzu, Hammer und Amboss.) Dieses *Hyomandibulare* ist bei Fischen für Fress- und Atembewegungen wichtig.

Die erste Phase dieser Umwandlung muss schnell erfolgt sein, denn zu Zeiten von *Acanthostega* hatte der Knochen seine alte Funktion schon verloren. Wahrscheinlich geschah das, während sich Gliedmaßen mit Fingern ausbildeten. Allerdings fungierte er noch lange nicht als Gehörknöchelchen. Ein Ohr mit Trommelfell benötigten erst die Landtiere. Für Jahrmillionen dürfte dieser ehemalige Kiemenknochen ein Schädelelement gewesen sein.

Routiniert auf der Höhe ihrer Zeit

Viele Befunde solcher Art haben das Bild der frühen Tetrapoden grundsätzlich verändert. Das waren keine bemitleidenswerten, chimären Kreaturen einer evolutionären Baustelle, die so richtig weder zum Wasser- noch zum Landleben taugten. Ihre Beine oder Ohren wird man heute nicht mehr als halb- oder unfertig bezeichnen. Ganz im Gegenteil handelte es sich um je eigene für die jeweilige Lebensweise nützliche Anpassungen. Wie immer hatte natürlich nicht alles weiterhin Bestand. Doch wir registrieren, wie auf jeder Stufe während dieses Übergangs neue Tiere in neue Nischen drängten. Einige davon erwiesen sich hierin sogar als Spezialisten.

Alles in allem handelte es sich bei den frühen Tetrapoden und ihren unmittelbaren Vorläufern um recht ansehnliche Geschöpfe. Fast alle Übergangsformen maßen rund einen Meter Länge, manche noch einiges mehr. Sie erbeuteten verschiedenste Fische und Wirbellose und waren dabei vermutlich nicht sonderlich wählerisch. Doch hiervon gab es offenbar Ausnahmen. Im Jahr 2000 entdeckte Per Erik Ahlberg von der Universität Uppsala (Schweden) in einem Museum in Lettland die Gattung *Livoniana*. Von ihr existiert ein Unterkieferfragment mit bizarrer Bezahnung. Statt der üblichen zwei Zahnreihen säumen je deren sieben die Unterkieferäste. Wie immer sich dieses absonderliche Tier ernährt haben mag – es schlug völlig aus der Art.

Übrigens fiel auch *Ichthyostega* aus der Reihe, jener vermeintliche Ahn der Landwirbeltiere. Erst neuere Studien haben das aufgezeigt. Dieser erste aus dem Devon bekannt gewordene Vierbeiner hatte die Paläontologen stets irritiert, weil sich die Konstruktion der Ohrregion bei keinem modernen oder ausgestorbenen Tetrapoden oder Fisch wiederfindet. Meinen Kollegen und mir standen neue Fossilien zur Verfügung; auch haben wir ältere Funde des »Fischschädellurchs« frisch präpariert; und vor allem durchleuchteten wir wichtige Exemplare computertomografisch. Der Sinn der eigenartigen Ohrkonstruktion beginnt sich nun abzuzeichnen. Die beste Erklärung dafür dürfte sein: *Ichthyostega* besaß hochspezialisierte Ohren – zum Hören unter Wasser!

Ein Trommelfell, wie bei den meisten Landwirbeltieren, fehlte diesem Tier. Dafür saß beidseits im Hinterkopf je eine wahrscheinlich luftgefüllte Kammer mit oben und seitlich verstärkten Wän- ▷

den. Und in den Boden dieser Kammern erstreckte sich jeweils ein äußerst zartes, löffelförmiges Gehörknöchelchen. Das vibrierte vermutlich, wenn Schallwellen die Luft in den Kammern in Schwingung versetzten, und übertrug die Vibration durch ein Loch in der Schädelkapsel zum Innenohr. Mit solchen Ohren dürfte das Tier einen Großteil der Zeit im Wasser zugebracht haben. Das unterstreichen zudem seine Schwanzflosse und die flossenartigen Hinterbeine.

Doch nicht der erste Landgänger?

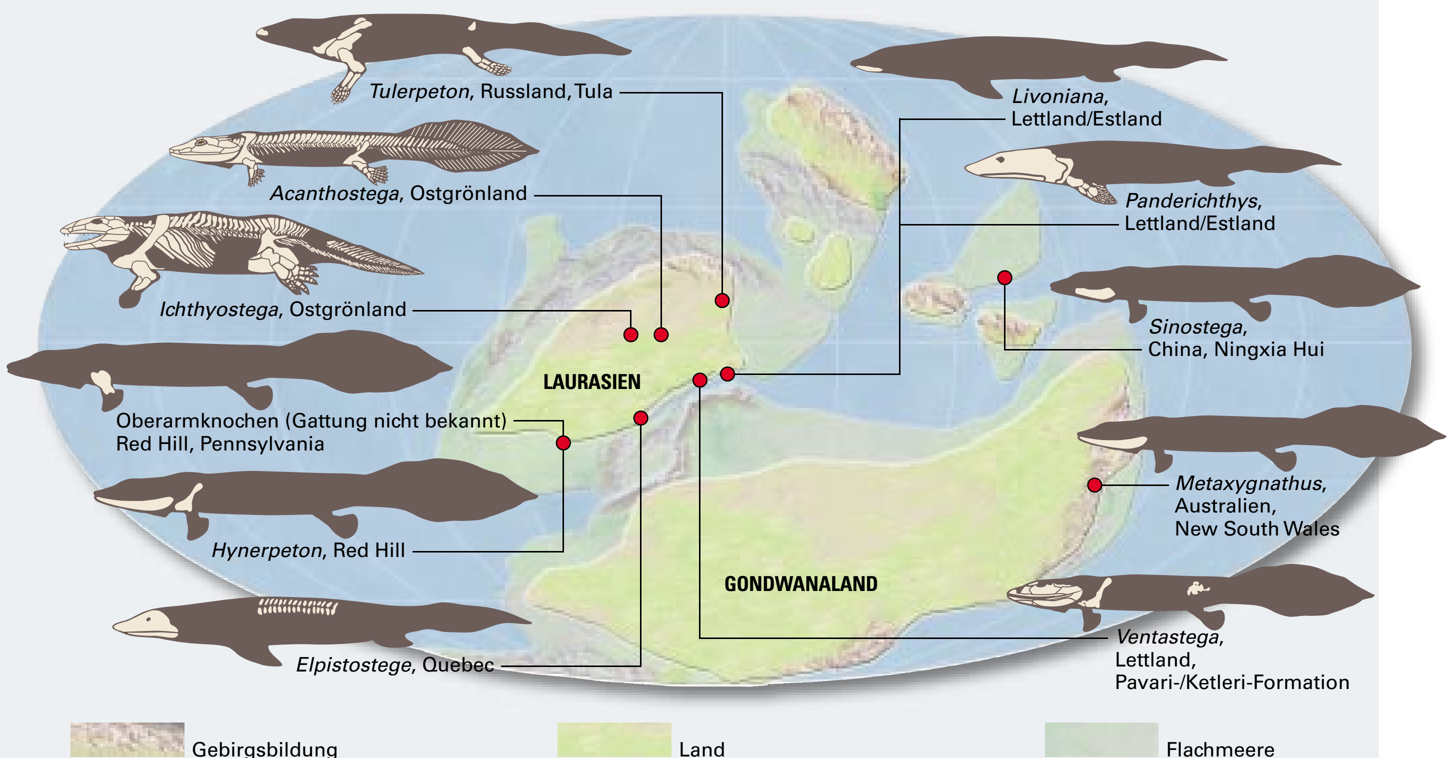
Daneben besaß *Ichthyostega* Skelettmerkmale, die es an Land gebrauchen konnte. Schultern und Arme waren kräftig. Die breiten, sich überlappenden Rippen bildeten praktisch ein Korsett, das sicherlich ein Kollabieren der Lunge außerhalb des Wassers zu verhindern vermochte. Trotzdem scheint sich dieses Geschöpf auf dem Trockenen in ganz eigener Weise fortbewegt zu haben – nämlich nicht mit sich seitlich biegender Wirbelsäule wie bei kriechenden Landwirbeltieren. Das lässt schon der Brustkorb erahnen, der ein seitliches Schlängeln des Rumpfes behinderte. Dazu fällt die Ausrichtung der Wirbelfortsätze auf: Bei *Ichthyostega* ändert sie sich entlang der Wirbelsäule, weswegen die daran ansetzenden Muskeln in den einzelnen Körperzonen unterschiedlich spezialisiert gewesen sein dürften. Dieses Muster finden wir nicht bei Fischen, auch nicht bei *Acanthostega* oder bei anderen frühen Tetrapoden. Es erinnert aber an die Wirbelsäule moderner Säugetiere. Offenbar bog *Ichthyostega* den Rumpf nicht wie Fische seitlich, sondern vorwiegend nach oben und unten. War das Tier an Land, dürften die paddelförmigen Hinterbeine zum Vorwärtskommen wenig beigetragen haben, Schultern und Arme umso mehr. Die Bewegung könnte ein wenig wie bei Robben ausgesehen haben: Zuerst wurde der Rücken hochgestemmt, dann beide Arme zugleich vorgeworfen und als Letztes der Hinterkörper nachgezogen.

Bis vor Kurzem hielten wir *Ichthyostega* für das bisher älteste Wirbeltier mit Anpassungen an eine nicht schwimmende Fortbewegungsweise. Seit der Noch-Fisch *Tiktaalik* in diese Rolle zu drängen scheint, darf man gespannt sein, inwiefern sich das Bild ändern wird. Wozu der Tetrapode *Ichthyostega* überhaupt aus dem Wasser ging, darüber lässt sich nur spekulieren. Fraß er Fische, die aufs Trockene geraten waren? Dann paarten sich die Tiere vielleicht weiterhin im Wasser, und sie lauschten dort nach Partnern – zu irgendetwas müssen die Ohren gut gewesen sein. In dem Fall sollte *Ichthyostega* Laute erzeugt haben. Oder nutzten die Tiere ihre Ohren zum Lauern auf Beute im Wasser? Gruben sie mit den kräftigen Vorderbeinen vielleicht an Land Löcher für ihre Eier?

Das Spezialmodell *Ichthyostega* verschwand später von der Bühne. Wie es aussieht, ging die Linie unter. Wir kennen kein fossiles Tier, das jünger als 360 Millionen Jahre ist und als möglicher Nachfahre passen würde. Damit steht diese Linie keineswegs allein. Wie oft in der Geschichte der Lebewesen gab es

Kosmopoliten schon im Devon

Von so vielen Stellen der Welt stammen Fossilien von frühen Tetrapoden und ihnen bereits sehr nahe stehenden Fischen aus der Verwandtschaft der Quastenflosser, dass man ihrer beider Verbreitung über fast alle damaligen tropischen und subtropischen Landregionen annehmen muss. Die ersten Vierfüßer lebten wohl im Süß- oder Brackwasser, nicht im Meer.



TETRAPODEN: ANDREW RECHER; KARTE: LUCY READING-IKKANDA



▷ zweifellos auch rund um die Evolution der frühen Tetrapoden viele Entwürfe, die sich später nicht durchsetzten. Zumindest zeichnet sich fast mit jedem neuen Fund stärker ab, dass sie im Devon mannigfaltiger waren, als sich die Paläontologen zunächst vorgestellt hatten. Von den weiteren Forschungen erwarten wir noch viele Überraschungen.

Schärfer eingrenzen lässt sich heute, wann die Tetrapoden entstanden. Etwa im späten Mittleren Devon lebten ihre unmittelbaren Vorgänger. Die ersten heute bekannten Vierbeiner waren im frühen Oberen Devon, vor rund 370 Millionen Jahren da. Mit einiger Sicherheit fanden wichtige Evolutionsschritte im Zeitraum vor grob gesagt 380 bis 375 Millionen Jahren statt.

Rätsel Hinterbeine

Spuren von diesen Entwicklungen finden sich keineswegs nur in Grönland, Nordkanada oder im Baltikum, sondern an erstaunlich vielen weit auseinander liegenden Orten der Erde. In gewissem Sinne waren die Tetrapoden des Devons und ihre Vorläufer insgesamt kosmopolitisch. Aus Fossilstätten im heutigen China etwa stammt die Gattung *Sinostega*, aus Australien die Gattung *Metaxygnathus*, vom Osten der USA kommt nicht nur der erwähnte Armknochen, sondern auch die Gattung *Hynerpeton*. So ziemlich in allen warmen Gebieten des damaligen Superkontinents scheinen diese Tiere aufgetreten zu sein, ein Zeichen für ihren Erfolg in jener Zeit (siehe Kasten S. 30). Außerdem dürften sie ökologisch recht vielseitig gewesen sein.

Die bislang etablierte Annahme, die Tetrapoden seien in einem Süßwasserumfeld evolviert, entstand wegen der ersten Funde von Ostgrönland. Einst existierte dort offensichtlich ein breites Flussbett, das in einem Monsunklima regelmäßig überflutete und wieder teilweise trockenfiel. Dieser Fluss führte zweifellos Süßwasser. Dagegen gab es an den baltischen und russischen Fundorten einst Brackwasser wechselnden Salzgehalts. Ökologisch besonders aufschlussreich ist die schon erwähnte Fossilstätte Red Hill in Pennsylvania. Es handelt sich ebenfalls um ein ehemaliges Flussbett, nur herrschte kein Monsun-, sondern ein gemäßigtes Klima.

Leider gibt es zu den anatomischen Umstrukturierungen während des Übergangs zu den Tetrapoden immer noch große Wissenslücken. Von der Evolution der Hinterbeine und des Beckens – entscheidenden Merkmalen der Vierbeiner – fehlen jegliche fossilen Schlüssel. Shubin hofft, hierzu bald lehrreiche Überreste von *Tiktaalik* zu finden. Bisher liegen entsprechende Skelettteile nur von den Gattungen *Ichthyostega* und *Acanthostega* vor, aber deren Hinterextremitäten waren schon zu weit entwickelt, um darüber Aufschluss zu geben, wie sie aus Flossen entstanden. Fast mit Sicherheit verlief auch diese Entwicklung nicht eingleisig und geradlinig. Außerdem wüssten wir gern sehr viel genauer, wie die Veränderungen der verschiedenen Körperteile ineinandergriffen, also in welchen Schritten sich zum Beispiel Hinter- und Vorderbeine oder auch das Ohr aufeinander bezogen heranbildeten.

Einsichten erwarten wir nicht nur von neuen Fossilien, sondern auch von der molekulargenetischen evolutionären Entwicklungsbiologie. Jetzt gerade ergeben sich erste Hinweise auf Ähnlichkeiten und Neuerungen in den genetischen Kontrollmechanismen für die Kiemenbildung beziehungsweise die Halsentwicklung bei Fischen, Säugetieren und Vögeln. Zum Beispiel haben die Tetrapoden zwar sämtliche Knochen verloren, die bei Fischen die Kiemen schützen. Aber die Steuergene zur Bildung dieser Knochen sind bei Mäusen immer noch vorhanden. Sie haben nur andere Aufgaben. Interessant ist, auch, dass in der Halsregion von Tetrapoden die regelnden Signalketten für die Gliedmaßenbildung ausgehebelt sind. An den Flanken eines Landwirbeltiers kann man mit bestimmten Tricks ohne Weiteres zusätzliche Gliedmaßen wachsen lassen, nicht aber am Hals. Als die Vierfüßer ihren Hals bekamen, muss im Genom etwas Besonderes geschehen sein.

Schwieriger dürfte herauszufinden sein – aber wundervoll wäre es zu wissen –, welche der bisher festgestellten Umwelten denn nun die allerersten Tetrapoden hervorbrachte. Bisher ahnen wir nur, dass es nicht im Meerwasser geschah. Nur zu gern würden wir rundum verstehen, welche Selektionsdrücke in den einzelnen Abschnitten des Wechsels vom Wasser aufs Land wirkten. Vielleicht wird die Forschung das Gesamtgeschehen nie vollständig aufklären, denn Fossilien decken nicht alles ab. Wir müssten schon ins Devon zurückreisen können. Erwarten dürfen wir aber weitere spannende Erkenntnisse zur Geschichte vom Landgang. ◁

AUTORIN UND LITERATURHINWEISE



Jennifer A. Clack lehrt Wirbeltierpaläontologie an der Universität Cambridge (England). Seit 25 Jahren forscht sie über die Ursprünge der Tetrapoden.

The emergence of early tetrapods. Von Jennifer A. Clack in: Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology (im Druck)

The axial skeleton of the devonian tetrapod *Ichthyostega*. Von Per Erik Ahlberg et al. in: Nature, Bd. 437, 1. Sept. 2005, S. 137

Gaining ground: The origin and evolution of tetrapods. Von Jennifer A. Clack. Indiana University Press, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Schlüssel zur Langlebigkeit

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Eine Hand voll Gene, die ganz verschiedenartigen Organismen über harte Zeiten hilft, kann zugleich deren Gesundheit und Lebensdauer insgesamt enorm steigern. Ihre Funktionsweise liefert vielleicht die Schlüssel, Alterskrankheiten zu bannen und auch unsere Lebensspanne auszudehnen.

Von David A. Sinclair und Lenny Guarente

Baujahr und Kilometerstand verraten recht viel über den Zustand eines Gebrauchtwagens. Der Zahn der Zeit und der Verschleiß hinterlassen unvermeidlich ihre Spuren. Mit dem Altern von Menschen erscheint es ähnlich, doch der Vergleich hinkt. Denn es besteht ein entscheidender Unterschied: Anders als Maschinen können biologische Systeme ihrem eigenen Verfall entgegenwirken – indem sie auf äußere Belastungen reagieren und unter Energieaufwand sich schützen und Schäden reparieren.

In der wechselvollen Geschichte der zahlreichen Theorien zum Altern gab es einst die These, das Ganze sei weniger ein Verfall als vielmehr eine aktive Fortsetzung der genetisch programmierten Entwicklung eines Lebewesens. Sobald dieses seine Geschlechtsreife erreicht habe, begännen »Alterungsgene« seine Schritte langsam, aber sicher bergab in Richtung Grab zu lenken. Nach heute gängiger Vorstellung ist Altern hingegen wirklich bloßer Verfall – verursacht dadurch, dass natürliche Mechanismen zur



Der typische Lebensbogen neigt sich wieder, wenn Wachstum und Vitalität dem Niedergang des Alterns weichen. Ließe sich die Macht von Langlebigkeitsgenen als Bremse nutzen, würde man sich vielleicht einmal auch jenseits der 70, 90 oder gar 100 noch so jugendlich fühlen wie mit 50.

Wartung und Reparatur des Körpers schlichtweg allmählich erlahmen. Aus evolutiver Sicht besteht eben kein Grund, so die Argumentation, sie über die reproduktive Phase eines Individuums hinaus am Laufen zu halten, wenn sie nicht mehr zum Fortpflanzungserfolg beitragen.

Wie wir und andere Forscher herausgefunden haben, besitzt eine Familie von Genen dennoch die Macht, die Stärke zelleigener Abwehr- und Reparaturaktivitäten zu erhalten, unabhängig vom Alter. Eigentlich haben diese Gene mit der Fähigkeit eines Lebewesens zu tun, zeitweise widrigen Bedingungen wie Hitze, Wasser- und Nährstoffmangel zu trotzen. Sie steigern seine Chancen, solche Krisen zu überstehen, indem sie den Funktionsmodus des Körpers bestmöglich auf Überleben ausrichten. Sofern diese Gene nur lange genug aktiviert bleiben, können sie auch Gesundheit und Lebensspanne dramatisch steigern. Kurzum: Sie verkörpern das Gegenteil von »Alterungsgenen« – nämlich Langlebigkeitsgene.

Mit den Forschungen hierzu begannen wir im letzten Jahrzehnt. Unsere Überlegung damals war, dass die Evolution ein universelles Steuerungssystem hervorgebracht haben sollte, das die bereits gut untersuchten Reaktionen auf Umweltstress koordiniert. Wir hofften, eines oder mehrere übergeordnete Gene zu identifizieren, die dabei als Schaltzentrale dienen – und somit auch als Hauptregulator der Lebensspanne. Gelänge uns das, ließen sich diese natürlichen Schutzmechanismen vielleicht in Waffen gegen die Krankheiten und Verfallsprozesse umschmieden, die inzwischen offenbar synonym für menschliches Altern stehen.

Hefe als Modell

Unter den in jüngerer Zeit entdeckten Genen befinden sich tatsächlich viele, die Stressresistenz und Lebensspanne von Labor态organismen beeinflussen – und daher Komponenten eines grundlegenden Mechanismus sein könnten, der widrige Bedingungen überstehen hilft (siehe Kasten S. 38). Unsere beiden Forschungslabors befassen sich aber in erster Linie mit einem speziellen Gen namens *SIR2*, das in vergleichbaren Formen bei allen bisher untersuchten Lebewesen vorkommt, einschließlich des Menschen. Zusätzlich eingebaute Kopien machen so unterschiedliche Organismen wie Hefen, Fadenwürmer und Taufliegen langlebiger. (Ob das auch bei größeren Tieren wie Mäusen funktioniert, untersuchen wir gerade.) Als eines der zuerst erkannten Langlebigkeitsgene ist *SIR2* zugleich das bestuntersuchte. An seiner Arbeitsweise lässt sich zeigen, wie ein genetisch regulierter Überlebensmechanismus auch einen positiven Einfluss auf Gesundheit und Lebensspanne haben kann. Das ist nicht der einzige Grund, warum wir uns hier auf dieses Beispiel beschränken. Die Hinweise verdichten sich, dass *SIR2* dabei sogar der Schlüssel, der Hauptregler sein könnte.

Dass dieses Gen etwas mit Langlebigkeit zu tun hat, erkannten wir erstmals an der Bäckerhefe. Die Idee, die Ursachen für die begrenzte Lebensspanne eines solch vergleichsweise einfachen, einzelligen Organismus würde uns irgendetwas über das menschliche Altern verraten, hielten viele Wissenschaftler damals für abwegig. Doch wir ließen uns nicht beirren.

Die Bäckerhefe teilt sich asymmetrisch: Die Mutterzelle schnürt eine kleinere, aus ihr herausknospende Tochterzelle ab. Nach typischerweise etwa 20 ▷



FOTOS: CARY WOLINSKY; BEARBEITUNG: JEN CHRISTIANSEN

▷ Teilungen stirbt die alternde Mutterzelle schließlich. Wie oft sie sich teilen konnte, dient als Maß für ihre so genannte replikative Lebensspanne und damit auch für Langlebigkeit.

Als einer von uns (Guarente) vor fast 15 Jahren Hefekolonien auf außergewöhnlich langlebige Zellen hin durchmusterte, um dafür verantwortliche Erbfaktoren zu finden, stieß er auf eine Mutation in einem Gen mit der Bezeichnung *SIR4*. Es trägt die Bauanweisung für eine Komponente in einem Proteinkomplex, in dem auch das Produkt von *SIR2* vorkommt. Die Mutation hatte letztlich zur Folge, dass sich das Protein von *SIR2* vermehrt an einem Abschnitt des Genoms ansammelte, der so genannte ribosomale DNA (rDNA) umfasst.

Dort reihen sich in zigfacher Wiederholung Gen-Einheiten aneinander, die für spezielle Bestandteile der zelleigenen Proteinfabriken, der Ribosomen, codieren. Mit durchschnittlich mehr als 100 dieser rDNA-Wiederholungseinheiten handelt es sich um den höchstrepetitiven Abschnitt im Erbgut einer Hefezelle. Er wird leicht instabil. Repetitive Sequenzen neigen nämlich dazu, zu rekombinieren. Beim Menschen können sich dadurch beispielsweise »Stottersequenzen« in einem bestimmten Protein-Gen so weit verlängern, dass dies zur Huntington-Krankheit führt (siehe SdW 1/2004, S. 60). Auch zahlreiche andere Erkrankungen gehen auf solche Effekte zurück.

Unsere an der Hefe gewonnenen Ergebnisse legten somit nahe, dass das Altern der Mutterzellen durch irgendeine Form von rDNA-Instabilität verursacht wurde, die sich durch das Produkt des *SIR2*-Gens abmildern ließ. Tatsächlich beobachteten wir eine überraschende Form: Nach mehreren Teilungen gliedern sich Extrakopien von rDNA als Ringe aus dem Genom aus. Diese werden wie die Chromosomen vor jeder Teilung der Mutterzelle repliziert, verbleiben jedoch danach vorzugsweise in deren Zellkern. Die sich immer mehr anhäufenden Ringe werden ihr schließlich zum Verhängnis: Vermutlich beansprucht ihr Vervielfältigen so viele Ressourcen, dass die Zelle es nicht mehr schafft, ihr eigenes Genom zu verdoppeln.

Schweigen ist Gold

Bekamen Hefezellen indes ein zusätzliches Exemplar ihres *SIR2*-Gens eingeschleust, so wurde die Bildung der rDNA-Ringe zurückgedrängt und die Lebensspanne um etwa 30 Prozent verlängert. Wie wir wenig später zu unserer Verblüffung feststellten, kam auch der Fadenwurm *Caenorhabditis elegans* durch Zusatzexemplare seines *SIR2*-Pendants in den Genuss eines verlängerten Lebens – hier sogar um die Hälfte. Überraschend war ein solch gleichsinniger Effekt nicht nur, weil es sich um zwei evolutionär weit getrennte Organismen handelte, sondern auch, weil sich bei diesem Wurm die Körperzellen nach dem Larvenstadium gar nicht mehr teilen. Somit musste sich sein Alterungsprozess von dem der Hefe unterscheiden. Jetzt wollten wir genau wissen, welche Aufgabe *SIR2* erfüllte.

Wie wir bald herausfanden, codierte das Gen für ein Enzym, das auf völlig neuartige Weise aktiviert wurde. Damals war bereits bekannt, dass Proteine von SIR-Genen am Stilllegen anderer Gene mitwirken. Tatsächlich steht das Kürzel für *silent information regulator*, was wörtlich »Regler stummer Information« bedeutet. Im Zellkern ist die DNA eines Chromosoms um spulenartige Komplexe aus Verpackungsmolekülen gewickelt (siehe Kasten rechts). Diese Proteine, die Histone, tragen chemische Markierungen, darunter Acetylgruppen, welche die Packungsdichte bestimmen. Durch Entfernen von Acetylgruppen wird das Ganze kompakter, was im Fall der Hefe schließlich den kritischen DNA-Abschnitt unzugänglich macht für jene Enzyme, die sonst für den Austritt von rDNA-Ringen sorgen. Entacetylierte Bereiche von Chromosomen werden als still oder stumm bezeichnet, weil die enge Verpackung alle hier liegenden Gene auch an ihrer Ausprägung hindert.

Sir2, das Protein von *SIR2*, ist zwar nur eines von mehreren Enzymen, die Acetylgruppen von Histonen entfernen. Aber es zeichnet sich, wie wir entdeckten, durch eine Besonderheit aus: Um aktiv zu werden, benötigte es unbedingt NAD (genauer NAD^+). Nicotinamid-adenin-dinucleotid, so der volle Name, spielt eine zentrale Rolle im Stoffwechsel jeder Zelle. Diese Beziehung elektrisierte uns. Denn dadurch war die Aktivität des Enzyms an Stoffwechselprozesse gekoppelt. Sollte hier womöglich ein Zusammenhang zu den positiven Auswirkungen einer strikt kalorienarmen Ernährung auf das Altern bestehen?

Auf Schmalkost gesetzte Tiere leben länger. Das wurde bereits vor über siebzig Jahren entdeckt. Bis heute ist sie die berühmteste und einzige Maßnahme, die erwiesenermaßen sicher funktioniert. Allerdings muss dazu die Kalorienmenge im typischen Fall um 30 bis 40 Prozent reduziert werden, ohne dass es zu einer unausgewogenen Ernährung kommt. Ratten, Mäuse und Hunde, möglicherweise aber auch Primaten, leben dann nicht nur länger, sondern bleiben dabei auch weitaus gesünder. Die meisten mit dem Alter zunehmenden Krankheiten, darunter Krebs, Diabetes und selbst neurodegenerative Erkrankungen, treten seltener auf. Der Organismus scheint geradezu auf Überleben getrimmt zu sein. Der einzige offenkundige Nachteil dabei: Manche Lebewesen werden steril.

Seit Jahrzehnten bemühen sich Wissenschaftler, die Wirkweise der Extremdiät zu ergründen, um dieses Wissen zum Wohl unserer Gesundheit auszunutzen (siehe »Der steinige Weg zur Anti-Aging-Pille«, SdW 7/2003, S. 58). Lange wurde der günstige Effekt schlicht einer Verlangsamung des Stoffwechsels zugeschrieben – bei einer mangels »Treibstoff« gedrosselten zellulären Energieproduktion fielen auch weniger ihrer schädlichen Nebenprodukte an. Doch diese Ansicht erscheint inzwischen über-

IN KÜRZE

- Widrige Bedingungen wie **Nahrungsmangel** bedeuten Stress für den Organismus. Kontrollgene verursachen dann Veränderungen im gesamten Körper, die ihn vorübergehend ganz auf Überleben einstellen.
- Bleibt diese **Stressreaktion** langfristig aktiviert, wirkt sie bei völlig verschiedenartigen Lebewesen lebensverlängernd und zugleich krankheitsvorbeugend.
- Als übergeordnete Regulatoren dieses Überlebensmechanismus fungieren möglicherweise Gene für so genannte **Sirtuine**.
- Ein besseres Verständnis, wie sie ihren positiven Effekt auf Gesundheit und Langlebigkeit ausüben, könnte zunächst zu **Therapien gegen menschliche Alterskrankheiten** führen und schließlich allgemein zu einem längeren vitalen Leben.

holt. Denn eine beschränkte Kalorienzufuhr verlangsamt den Stoffwechsel zumindest bei Säugetieren nicht, berücksichtigt man die sich reduzierende Körpermasse. Bei Hefen und Würmern wird er sogar beschleunigt und auch verändert. Wir glauben vielmehr, dass der Kalorienmangel Stress auf den betroffenen Organismus ausübt. Ähnlich wie natürliche Nahrungsknappheit löst er physiologische Gegenmaßnahmen aus, welche die Überlebenschancen stark verbessern. Dazu gehören bei Säugetieren Veränderungen im Bereich Energieproduktion, Zellschutz und Reparatur sowie ▷

Wie Sir2 Hefe vor Stress schützt

Mäßiger Stress verlängert die normale Lebensspanne von Hefen um ungefähr 30 Prozent durch verstärkte Aktivierung des Enzyms Sir2. Stressfaktoren können diesen Effekt über zwei Wege in der Zelle erzielen (obere Hälfte der Grafik), die beide zur Unterdrückung eines jeweils anderen Hemmstoffs von Sir2 führen. Das überaktivierte Enzym verhindert wiederum eine Form von Genom-Instabilität, die sonst nach rund 20 Teilungen zum Tod der Mutterzelle beitragen würde.

Nahrungsmangel und weitere Stressfaktoren wie Stickstoffmangel, zu hohe Salzkonzentration oder Hitze aktivieren das Gen *PNC1*. Sein Protein baut in der Zelle Nicotinamid ab, einen Hemmstoff von Sir2.

Die Kalorienrestriktion bewirkt auch, dass Hefezellen zur Energiegewinnung von Gärung auf Zellatmung umschalten. In den Zellkraftwerken, den Mitochondrien, wird über die so genannte Atmungskette das Elektronenträgermolekül NADH zu NAD umgewandelt. NADH hemmt Sir2, NAD aktiviert das Enzym.

Sir2 entfernt Acetylgruppen von Histonen, sodass diese Verpackungsproteine die DNA zu einem dichteren Paket zusammenschnüren. Das Enzym deacetyliert einen bestimmten DNA-Abschnitt, der dazu neigt, ringförmige Stücke genetischen Materials »abzuschnüren«, wenn die Zelle ihr Genom vor ihrer Teilung kopiert.

Bei Zellen der Bäckerhefe schnürt sich von der großen Mutterzelle eine kleinere Tochterzelle ab. Nach mehreren solcher Teilungen beginnen sich in der Mutter gewöhnlich DNA-Ringe außerhalb ihrer Chromosomen anzuhäufen. Nach etwa 20 Teilungen leidet die Zelle darunter so sehr, dass sie schließlich abstirbt.

Verstärkte Sir2-Aktivität schützt Hefezellen vor der Bildung extrachromosomaler DNA-Ringe, weil die verwundbare Genomregion enger zusammengepackt wird. Dadurch bleiben die Zellen länger jung und setzen ihre Zellteilung länger fort.

bei der Aktivierung des zellulären Selbstmordprogramms, der Apoptose.

Um herauszufinden, welchen Part das Sir 2-Enzym dabei spielen könnte, konzentrierten wir uns zunächst auf einfach aufgebaute Organismen. Wie wir feststellten, beeinflusst Nahrungsknappheit bei der Hefe die enzymatische Aktivität von Sir 2 auf zwei Wegen:

- zum einen durch Anschalten eines Gens mit der Bezeichnung *PNC1*. Das von ihm codierte Enzym baut in den Zellen Nicotinamid ab – dieses dem Vitamin B3 ähnelnde Molekül hemmt das Sir 2-Protein. Im Einklang mit der Vorstellung, eine Kalorienreduktion wirke als so genannter Stressor, der in den Zellen eine Überlebensantwort aktiviert, springt das *PNC1*-Gen auch bei anderen milden Stressfaktoren an wie zu warmer oder zu salzhaltiger Umgebung. Beide Bedingungen verlängern bekanntermaßen ebenfalls die reproduktive Lebensspanne von Hefen.
- zum anderen durch Anregung der Zellatmung. Bei dieser Form der Energieproduktion entsteht nebenbei NAD (die oxidierte Form) unter Verbrauch von NADH (der reduzierten Form von NAD). Während NAD Sir 2 aktiviert, hemmt NADH das Enzym. Verschiebt sich das Verhältnis der beiden in der Zelle, so wirkt sich dies somit grundlegend auf die Aktivität von Sir 2 aus.

Doch ist das Protein für den lebensverlängernden Effekt auch wirklich notwendig? Eindeutig ja, wie beispielsweise ein künstliches Ausschalten seines Gens zeigte. Denn bei immerhin schon so komplexen Organismen wie der Taufliege verlängerte sich die Lebensspanne bei Nahrungsmangel nur, wenn das zugehörige Gen vorhanden war. Und weil eine erwachsene Taufliege aus zahlreichen Geweben und Organen besteht, die denen von Säugetieren analog sind, vermuten wir, dass wahrscheinlich auch bei ihnen das entsprechende Gen erforderlich ist, damit Schmalkost diesen Effekt erzielt.

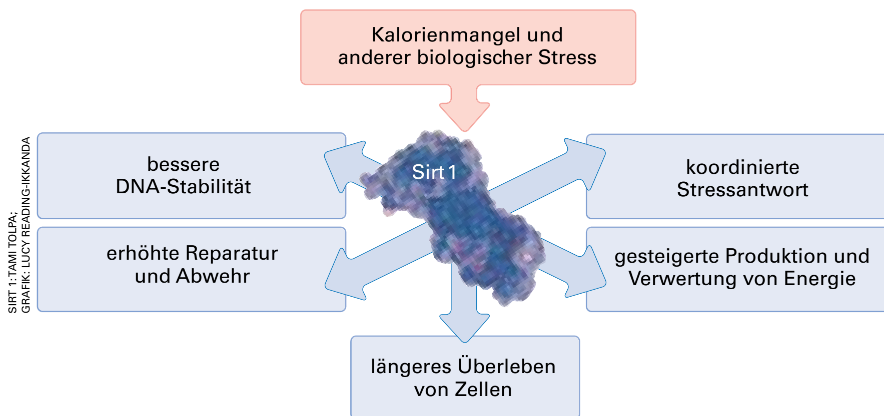
Für Menschen freilich wäre eine solche Radikaldiät keine vernünftige Option, um die Vorteile begrenzter Kalorienzufuhr zu nutzen. Erforderlich sind Wirkstoffe, welche die Aktivität von Sirtuinen – so lautet der Sammelbegriff für Sir 2-artige Enzyme – in der gewünschten Weise modulieren (die Silbe »tu« steht für das gesprochene *two*, englisch zwei). Als besonders viel versprechende sirtuinaktivierende Substanz – abgekürzt

Wege zur Lebensverlängerung

Inzwischen ist ein ganzes Sortiment an Genen identifiziert, die bei verschiedenen Organismen die Lebensdauer positiv oder negativ beeinflussen können. Einige davon – darunter das Gen *SIR2* und seine Verwandten – fördern die Langlebigkeit, wenn sie in mehreren Kopien vorhanden sind oder wenn die Aktivität des Proteins, für das sie codieren, verstärkt wird. Viele andere Gene des Sortiments und ihre Proteine haben dagegen einen negativen Effekt auf die Lebensdauer, sodass hier eine Drosselung ihrer Aktivität günstig wirkt. Ein Beispiel bietet das Gen für Zellrezeptoren, an die Insulin und der insulinähnliche Wachstumsfaktor 1 (IGF-1) andocken. Es trägt bei Würmern die Bezeichnung *daf-2*. Seine Unterdrückung in ausgewachsenen Würmern greift in die Signalwege von Insulin und IGF-1 ein und verlängert die Lebensspanne um immerhin 100 Prozent. Die Unterdrückung mehrerer anderer dieser Gene, die mit Wachstum zusammenhängen, oder ein Eingriff in die Signalkaskade, die sie in Gang setzen, fördert ebenfalls Langlebigkeit.

Einige der unten aufgelisteten Gene und ihre Proteine regulieren bei begrenzter Kalorienzufuhr Enzyme der Sir2-Familie (Sirtuine) oder werden umgekehrt von diesen gesteuert. Sie könnten daher zu einem übergeordneten regulatorischen Netzwerk für das Altern gehören. Die Autoren halten das *SIR2*-Gen und seine Verwandten für die möglichen Dirigenten dieses Netzwerks.

Gen oder Signalweg (Entsprechung beim Menschen)	Spezies und erreichte Lebensverlängerung	ist mehr oder weniger günstiger?	hauptsächlich beeinflusste Prozesse	mögliche Nebenwirkungen einer Manipulation
Sir2 (Sirt1)	Hefe, Wurm, Fliege / 30 Prozent	mehr	Überleben von Zellen, Metabolismus und Stressantworten	unbekannt
TOR (TOR)	Hefe, Wurm, Fliege / 30 bis 250 Prozent	weniger	Zellwachstum und Nährstofferfassung	vermehrte Infektionen und Krebs
Daf-/FoxO-Proteine (Insulin, IGF-1)	Wurm, Fliege, Maus / 100 Prozent	weniger	Wachstum und Glucosestoffwechsel	Zwergwuchs, Unfruchtbarkeit, kognitive Einbußen, Gewebedegeneration
Clock-Gene (*CoQ*-Gene)	Wurm / 30 Prozent	weniger	Synthese von Co-Enzym Q	unbekannt
Amp-1 (AMPK)	Wurm / 10 Prozent	mehr	Stoffwechsel und Stressantworten	unbekannt
Wachstumshormon (Wachstumshormon)	Maus, Ratte / 7 bis 150 Prozent	weniger	Regulation der Körpergröße	Zwergwuchs
p66Shc (p66Shc)	Maus / 27 Prozent	weniger	Produktion freier Radikale	unbekannt
Katalase-Gen *(CAT)*	Maus / 15 Prozent	mehr	Entgiftung von Wasserstoffperoxid	unbekannt
Prop1, pit1 (Pou1F1)	Maus / 42 Prozent	weniger	Aktivität der Hypophyse	Zwergwuchs, Sterilität, Hypothyroidismus
Klotho (Klotho)	Maus / 18 bis 31 Prozent	mehr	Insulin, IGF-1 und Regulation von Vitamin D	Insulinresistenz
Methuselah (CD97)	Fliege / 35 Prozent	weniger	Stressresistenz und Kommunikation von Nervenzellen	unbekannt



Bei Säugetieren scheint das Enzym Sirt1 – es entspricht Sir2 in der Hefe – für den gesundheitsfördernden und lebensverlängernden Effekt einer begrenzten Kalorienzufuhr verantwortlich zu sein. Nahrungsmangel und andere biologische Stressfaktoren steigern seine Aktivität, was wiederum Veränderungen in den Zellen bewirkt. Über eine vermehrte Produktion bestimmter Signalmoleküle, wie etwa Insulin, koordiniert Sirt1 möglicherweise die Stressantwort im ganzen Körper.

STAC, nach dem englischen Begriff dafür – hat sich Resveratrol erwiesen. Dieses kleine Molekül wird von vielen Pflanzen unter Stressbedingungen hergestellt und ist auch in Rotwein enthalten. Pflanzen erzeugen nach derzeitigem Stand noch mindestens 18 weitere Substanzen mit einer solchen Eigenschaft – möglicherweise regulieren sie damit ihre eigenen Sir 2-Enzyme.

Längeres Leben dank Rotweinsubstanz

Wird Resveratrol der Nahrung von Hefen, Würmern oder Fliegen zugesetzt, so verlängert sich ihre Lebensspanne wie bei Schmalkost um etwa ein Drittel, aber wiederum nur, wenn diese Organismen ein funktionsfähiges *SIR2*-Gen besitzen. Umgekehrt lässt sich bei veränderten Taufliegen, die auf Grund einer Überproduktion des Proteins bereits langlebiger sind, die Grenze weder durch Resveratrol noch durch Kalorienrestriktion weiter hinausschieben. Die einfachste Erklärung dafür ist, dass jede Maßnahme für sich lebensverlängernd wirkt, indem sie das Enzym bei Fliegen aktiviert.

Erhalten normale Fliegen Resveratrol, können sie fressen, so viel sie wollen, und leben trotzdem länger als sonst. Zudem leiden sie nicht an verminderter Fruchtbarkeit, die oft Folge der Extremdiät ist. Das sind gute Neuigkeiten für jene Forscher, die Medikamente, die an Sirtuinen ansetzen, gegen menschliche Krankheiten entwickeln möchten. Doch zunächst gilt es, die Funktion dieser Enzyme bei Säugetieren besser zu verstehen.

Dem *SIR2*-Gen der Hefe entspricht bei Säugetieren das Gen *SIRT1*, fachlich ausgedrückt: Es ist ihm homolog. Sein Protein – Sirt 1 – entfernt ebenfalls Acetylgruppen, allerdings von einer größeren Bandbreite von Proteinen, und das nicht nur im Zellkern, sondern auch außerhalb im Zellplasma. Mehrere der bislang identifizierten Zielproteine steuern wichtige Prozesse, darunter Apoptose, Zellabwehr und Stoffwechsel (siehe Kasten auf S. 40). Die *SIR2*-Genfamilie hat also anscheinend auch bei Säugetieren ihre Rolle als möglicher Lebensverlängerer beibehalten. Doch wie es bei größeren und komplexer aufgebauten Organismen nicht überrascht, sind dort die Signalwege, über die Sirtuine ihre Wirkung entfalten, erheblich verwickelter.

Bei Mäusen und Ratten lässt mehr Sirt 1 beispielsweise manche Zellen noch Stress überleben, bei dem sie sonst schon ihr Selbstmordprogramm eingeleitet hätten. Das Enzym reguliert unter anderem die Aktivität weiterer Schlüsselproteine, darunter p53, FoxO und Ku70, die entweder die Selbstmordschwelle beeinflussen oder die Zellreparatur anstoßen (siehe Kasten S. 40). Dadurch erkauft es mehr Zeit für eine zugleich wirksamere Behebung der Schäden.

Über die gesamte Lebensdauer gesehen könnte Zellverlust durch Apoptose ein bedeutender Faktor des Alterns sein, insbesondere von nicht erneuerbaren Geweben wie in Herz und Gehirn. Ein Verlangsamen des Schwunds mag einer der Wege sein, wie Sirtuine ihre positive Wirkung auf Gesundheit und Lebensspanne entfalten. Ein eindrucksvolles Beispiel bei Säugetieren bietet die Wallersche Mausmutante. Bei diesen Tieren sind durch Verdopplung eines einzigen Gens die Nervenzellen hochresistent gegen Stress, sodass sie bei Schlaganfällen, Chemotherapien und neurodegenerativen Erkrankungen nicht so leicht absterben.

Im Jahr 2004 zeigte Jeff Milbrandt von der Washington-Universität in St. Louis mit seinen Kollegen, dass infolge der Wallerschen Genmutation die Aktivität eines Enzyms steigt, das an der Synthese von NAD beteiligt ist. Offensichtlich schützt das überschüssige NAD Neuronen, indem es seinerseits das Sirt 1-Protein aktiviert. Mit STACs wie Resveratrol ließ sich, wie das Team dann feststellte, ein ganz ähnlicher Schutz bei Neuronen normaler Mäuse erzielen.

Wie eine noch jüngere Studie von Christian Néri vom französischen Nationalinstitut für Gesundheit und Medizinische Forschung in Paris ergab, beugen Resveratrol und Fisetin (ein weiteres STAC) sogar dem Absterben von Nervenzellen genmanipulierter Würmer und Mäuse vor, die als Modellorganismen für die menschliche Huntington-Krankheit dienen. Wieder funktionierte der Schutz nur in Gegenwart funktionsfähiger Sirtuin-Gene.

Fett und Fasten

Doch zurück zur Kalorienrestriktion und ihren günstigen Auswirkungen: Wenn Sirtuine und ihre Gene wirklich die Vermittlerrolle spielen – wie kann dann die Ernährung nicht nur deren Aktivität in der Zelle, sondern damit zugleich die Alterungsprozesse im ganzen Tier steuern? Wie Pere Puigserver von der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (Maryland) mit seinen Kollegen feststellte, erhöht sich beim Fasten der NAD-Gehalt in Leberzellen, was erwartungsgemäß das Enzym Sirt 1 stärker aktiviert. Zu den Proteinen, die es von Acetylgruppen befreit, gehört auch PGC-1α. Über diesen wichtigen Regulator (einem Co-Aktivator für die Transkription, das Abschreiben von Genen) werden schließlich Änderungen im zellulären Glucosestoffwechsel herbeigeführt. Sirt 1 fungiert somit als Sensor, der auf die Verfügbarkeit von Nährstoffen reagiert und zugleich die Reaktion der Leber darauf regelt.

Ähnliche Befunde sprechen für ein Modell, wonach das Enzym als ein zentraler Stoffwechselregulator in Leber- wie auch in Muskel- und Fettzellen dient, indem es hier Schwankungen der Nährstoffzufuhr über das veränderte NAD/ ▷

▷ NADH-Verhältnis erfasst und das Muster der Genaktivität in diesen Geweben weithin beeinflusst. Dieses Modell würde auch erklären, wie Sirt 1 viele der Gene und Signalwege einbeziehen könnte, die sich auf die Langlebigkeit auswirken (beschrieben im Kasten S. 38).

Seine körperweiten Aktivitäten vermittelt das Enzym jedoch möglicherweise über mehrere Mechanismen. So geht eine andere bestechende Hypothese davon aus, dass Säugetiere über die im Körperfett gespeicherten Energievorräte registrieren, wie gut sie mit Nahrung versorgt sind. Abhängig von den Reserven an diesem Hauptbrennstoff senden Fettzellen unterschiedliche hormonelle Signale an Zellen anderer Gewebe. Da Schmalkost Depots abbaut, sorgt sie möglicherweise für ein hormonelles Muster, das Knappheit signalisiert, was wiederum Abwehrmechanismen der Zellen aktiviert. Gestützt wird diese Idee durch bestimmte gentechnisch veränderte Mäuse, die extrem mager bleiben, egal wie viel sie fressen: Auch sie leben gewöhnlich länger.

Angesichts dieser Hypothese fragten wir uns, ob Sirt 1 vielleicht im Gegenzug auch die Fettspeicherung regelt. Tatsächlich wird das Enzym in Fettzellen bei eingeschränkter Nahrungszufuhr aktiver, worauf Brennstoff aus den Depots in den Blutstrom übertritt, damit andere Gewebe daraus Energie gewinnen können. Sirt 1 registriert die Ernährungssituation – so nun unsere Annahme – und legt dann fest, wie viel Fett in den Zellen gespeichert, und damit auch, welches Hormonmuster von ihnen erzeugt wird. Dieser Effekt würde wiederum bestimmen, wie schnell ein Organismus altert – und damit Sirt 1 zu einem Schlüsselregulator für die durch Kalorienrestriktion herbeigeführte Langlebigkeit bei Säugetieren machen.

Dadurch ergäbe sich auch ein enger Zusammenhang zwischen Altern und durch Übergewicht geförderten Stoffwechselerkrankungen wie Typ2-Diabetes. Gelänge es, pharmakologisch in die Sirt 1-Signalkaskade von Fettzellen einzugreifen, ließe sich möglicherweise nicht nur der Alterungsprozess verlangsamen, sondern auch bestimmten Krankheiten vorbeugen. Das Enzym beeinflusst überdies einen weiteren kritischen Prozess: Entzündungen. Sie spielen unter anderem bei Krebs, Arthritis, Asthma, Herzleiden und neurodegenerativen Erkrankungen eine Rolle. Nach neueren Untersuchungen von Wissenschaftlern um Martin Mayo an der Universität von Virginia in Charlottesville hemmt Sirt 1 den entzündungsfördernden Proteinkomplex NF-κB. Der Sirt 1-Aktivator Resveratrol erzielt den gleichen Effekt. Dies ist in zweierlei Hinsicht ermutigend: Denn zum einen ist die Suche nach NF-κB-Inhibitoren ein sehr aktives Gebiet der Pharmaforschung, zum anderen ist bereits wohlbekannt, dass eine beschränkte Kalorienzufuhr exzessive Entzündungsreaktionen unterdrückt.

Wenn das SIR 2-Gen in seinen Versionen wirklich das übergeordnete Steuerungselement eines stressaktivierten regulatorischen Systems für das Altern ist, so zieht es die Fäden möglicherweise als Dirigent eines Orchesters, das sich aus hormonellen Netzwerken, intrazellulären regulatorischen Proteinen und verschiedenen Genen zusammensetzt, die mit Langlebigkeit assoziiert sind. So war

Sirtuine in der Zelle

Das Sirt 1-Enzym ist das bestuntersuchte, aber nicht das einzige Sirtuin von Säugetieren. Es entfernt Acetylgruppen von anderen Proteinen im Zellkern wie auch im Zellplasma und verändert dadurch ihr Verhalten. Viele seiner Zielmoleküle sind entweder so genannte Transkriptionsfaktoren, die Gene direkt aktivieren, oder regulatorische Proteine, die diese Faktoren beeinflussen (siehe Beispiele rechts unten). Auf diese Weise kann Sirt 1 eine große Bandbreite wichtiger Zellfunktionen kontrollieren.

Ob seine Verwandten, die in unterschiedlichen Bereichen der Zellen vorkommen, ebenfalls die Lebensdauer beeinflussen, wird ebenso wie ihre genaue Rolle noch untersucht. Sirt 2 beispielsweise modifiziert Tubulin, einen Bestandteil des Zellgerüsts, und beeinflusst möglicherweise die Zellteilung. Sirt 3 ist in den Kraftwerken der Zelle, den Mitochondrien, aktiv und scheint auch an der Regulation der Körpertemperatur beteiligt zu sein. Mutationen im Gen, das für Sirt 6 codiert, werden mit vorzeitiger Alterung in Verbindung gebracht.



Einige Zielproteine von Sirt 1

FoxO1, FoxO3 und FoxO4: Transkriptionsfaktoren für Gene, die am Zellschutz und Glucosestoffwechsel beteiligt sind
Histone H3, H4 und H1: kontrollieren die Packungsdichte der DNA in den Chromosomen
Ku70: Transkriptionsfaktor, der die DNA-Reparatur und das Überleben der Zelle fördert
MyoD: Transkriptionsfaktor, der Muskelentwicklung und Gewebsreparatur fördert
NcoR: Regulator, der zahlreiche Gene beeinflusst, darunter solche, die am Fettstoffwechsel und an Entzündungsprozessen beteiligt sind sowie am Funktionieren anderer Regulatoren, etwa des Proteins PGC-1α
NF-κB: Transkriptionsfaktor, der Entzündungen, das Überleben von Zellen und das Zellwachstum steuert
P300: Regulator, der für das Anheften von Acetylgruppen an Histone sorgt
p53: Transkriptionsfaktor, der den programmierten Tod geschädigter Zellen einleitet
PGC-1α: Regulator, der die Zellatmung kontrolliert und anscheinend eine zentrale Rolle bei der Muskelentwicklung spielt



eine der bemerkenswerten Entdeckungen der letzten Jahre, dass das Sirt 1-Enzym auch die Bildung von Insulin und dem insulinähnlichen Wachstumsfaktor 1 (IGF-1) reguliert und dass diese beiden wichtigen Signalmoleküle wiederum innerhalb einer komplexen Rückkopplungsschleife die Produktion von Sirt 1 zu regeln scheinen. Mit dieser faszinierenden Beziehung ließe sich erklären, wie die Sirt 1-Aktivität eines Gewebes anderen Zellen im Körper übermittelt werden könnte. Außerdem bestimmt der Gehalt an diesen beiden Substanzen im Blut bekanntermaßen die Lebensspanne von Würmern, Fliegen und Mäusen – möglicherweise auch die von uns Menschen.

Zu früh geboren

Seit jeher ist es ein Traum der Menschheit, das Altern zu verlangsamen. Für manche unter uns scheint daher kaum vorstellbar, dass dies durch »Herumschrauben« an einer Hand voll Gene gelingen könnte. Doch nachweislich lässt sich das Altern von anderen Säugetieren durch eine einfache Umstellung der Ernährung hinauszögern – auf eine strikt kalorienbegrenzte Kost. Und wie wir gezeigt haben, kontrollieren Sirtuin-Gene viele derselben molekularen Signalketten, die von der Umstellung beeinflusst werden. Ohne genau die mutmaßlich unzähligen Ursachen des Alterns mit seinen Gebrechen zu kennen, haben wir ferner bereits bei verschiedenen Lebewesen nachgewiesen, dass es sich auch ohne Dauerfasten hinauszögern lässt. Wir brauchen nur ein paar Regulatoren zu manipulieren – und sie verhelfen diesen Organismen von selbst zu besserer Gesundheit.

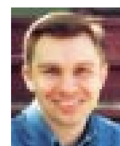
Wir wissen auch, dass die SIR 2-Genfamilie evolutionär sehr alt ist. Denn deren Vertreter und ihre Proteine finden sich heute bei so verschiedenen Organismen wie Bäckerhefe, *Leishmania*-Parasiten, Fadenwürmern, Fliegen und Menschen. Sirtuine bestimmen bei allen die Länge des Lebens – nur beim Menschen ist das bisher noch nicht untersucht. Allein schon auf Grund dieser evolutionären Basis sind wir zuversichtlich, dass in menschlichen Sirtuin-Genen wohl auch der Schlüssel für unsere Gesundheit und Lebensdauer liegt.

Unsere beiden Arbeitsgruppen führen gerade sorgfältig kontrollierte Experimente an Mäusen durch, die uns schon bald erste Antworten liefern werden, ob das Sirt 1-Gen bei Säugern diese Funktion erfüllt. Bis wir allerdings wissen, ob und wie Sirtuin-Gene die Lebensspanne von Menschen festlegen, werden wir uns sicher noch Jahrzehnte gedulden müssen. Wer hofft, eine Pille zu schlucken und 130 zu werden, ist möglicherweise ein Jahrhundert zu früh geboren. Aber immerhin kann er vielleicht noch zu Lebzeiten einmal von Medikamenten profitieren, welche die Aktivität von Sirtuin-Enzymen modulieren, um bestimmte Leiden wie Alzheimer, Krebs, Diabetes und Herzerkrankungen zu behandeln. Für mehrere Wirkstoffe, die zur Therapie von Diabetes, Herpes und neurodegenerativen Krankheiten bestimmt sind, hat zumindest bereits die klinische Erprobung begonnen.

Langfristig hoffen wir, dass die Entschlüsselung der Geheimnisse von Langlebigkeitsgenen mehr erlauben wird, als altersbedingte Erkrankungen bloß zu behandeln. Denn besser wäre, sie zu verhindern. Wie wird aber eine Gesellschaft aussehen, in der sich die Menschen bis weit in ihre Neunziger jugendlich fühlen und relativ frei von heute üblichen Krankheiten sind? Einige Besorgte mögen sich fragen, ob es überhaupt gut ist, an unserer Lebensspanne herumzuschrauben. Doch zu Beginn des 20. Jahrhunderts betrug die Lebenserwartung eines Neugeborenen nur etwa 45 Jahre. Seitdem ist sie auf ungefähr 75 gestiegen, hauptsächlich dank dem Aufkommen von Antibiotika und Fortschritten im Gesundheitswesen, wodurch früher oft tödliche Infektionen behandelt oder vermieden werden können.

Dem dramatischen Anstieg der Lebenserwartung hat sich die Gesellschaft angepasst. Sicher sehnen sich nur wenige nach einem Leben ohne diese medizinischen Errungenschaften zurück. Bestimmt werden künftige Generationen, die einmal gewohnt sind, älter als 100 Jahre zu werden, auch unsere gegenwärtigen Bemühungen um bessere Gesundheit als primitive Ansätze einer vergangenen Ära werten. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE



David A. Sinclair kam 1995 als Postdoc zu **Leonard P. Guarente** am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge. Er ist inzwischen Direktor der Paul-F.-Glenn-Laboratorien zur Aufklärung der biologischen Mechanismen des Alterns an der Harvard Medical School sowie Beigeordneter des Broad-Instituts für Systembiologie in Cambridge. Guarente, Novartis-Professor für Biologie, gehört seit 25 Jahren der Fakultät des M.I.T. an. Beide Wissenschaftler haben jeweils eine eigene Biotechnologiefirma gegründet, um sirtuinaktivierende Moleküle für den pharmazeutischen Einsatz zu entwickeln.

Das Wunder der über 120-Jährigen. Von Shino Nemeto und Toren Finkel in: SdW, November 2004, S. 70

Toward a unified theory of caloric restriction and longevity regulation. Von David A. Sinclair in: Mechanisms of Aging and Development, Bd. 126, Nr. 9, S. 987, September 2005

Caloric restriction, Sirt1 and metabolism: understanding longevity. Von Laura Bordone und Leonard Guarante in: Nature Reviews Molecular and Cell Biology, Bd. 6, S. 298, April 2005

The secrets of aging. Von Sophie L. Rovner in: Chemical & Engineering News, Bd. 82, Nr. 34, S. 30, 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

LATTE MACCHIATO

Hydrodynamik im Kaffeeglas

Genießern mit Hang zur Physik empfiehlt der Küchenchef heute: Latte macchiato auf hydrodynamische Art.

Von Florian Beißner

Milch aufschäumen und in ein großes Glas geben, dann vorsichtig frisch gebrühten Espresso eingießen. Auch optisch ist das Trendgetränk Latte macchiato ein Genuss, sofern der »Barista« hinter dem Thresen sein Handwerk versteht. Die wörtliche Übersetzung des Namens als »befleckte Milch« wird dem Latte macchiato kaum gerecht. Zumal er auch ein intellektuelles Vergnügen bereiten kann, denn was da im Glas geschieht, ist pure Physik. Da Espresso eine geringere Dichte als Milch besitzt, sammelt er sich zunächst im oberen Bereich des Glases. Doch in der Grenzschicht vermischen sich die beiden Flüssigkeiten. Wer genau hinschaut, kann hier sogar Wirbel beobachten.

So einfach dieses Geschehen wirkt, genau versteht man diese Vorgänge bislang nicht. Dabei wurde die nach den Physikern Claude Louis Marie Henri Navier (1785–1836) und Sir George Gabriel Stokes (1819–1903) benannte Navier-Stokes-Gleichung, eine der Grundgleichungen hydrodynamischer Prozesse, bereits vor über 150 Jahren aufgestellt. Doch sie ist von so komplexer Struktur, dass bis heute keine mathematisch exakte Lösung der Gleichung bekannt ist. Das Interesse daran ist so groß, dass das Clay Mathematics Institute in Cambridge (Massachusetts) eine Million Dollar für die Entdeckung einer solchen Lösung ausgelobt hat. Natürlich geht es den Forschern dabei nicht um den Latte macchiato. Die Hydrodynamik spielt in vielen Naturwissenschaften eine wichtige Rolle. Ihre Gesetze beschreiben so unterschiedliche Phänomene wie die Explosion massereicher Sterne, die Dynamik von Lavaflüssen oder die Strömungen in den Ozeanen.

Aber eben auch die Vorgänge im Übergangsbereich zwischen Espresso und Milch im Latte macchiato. Denn dort kann man bereits kurz nach dem Eingießen beobachten, wie eine Abfolge von mehreren Schichten entsteht, die sich deutlich voneinander abheben. Dieser Effekt wird in der Hydrodynamik Layering genannt. Er tritt dann auf, wenn neben einem Temperaturunterschied auch ein Konzentrationsgefälle eines oder mehrerer gelöster Inhaltsstoffe existiert. Denn Temperatur und Konzentration bestimmen die Dichte der Flüssigkeit.

Auf den ersten Blick ist nicht verständlich, warum der nach dem Eingießen vorliegende Zustand in Bewegung gerät. Sofern der Barista sauber gearbeitet hat, ist der Espresso etwas wärmer als die etwa siebzig Grad Celsius heiße Milch. Da bei diesen Temperaturverhältnissen Letztere dichter ist als der darüberliegende Kaffee, sollte der Zustand stabil sein. Dass dem nicht so ist, beruht auf der Temperaturdifferenz zwischen der Flüssigkeit im Glas und der Luft des umgebenden Raums. Sowohl Espresso als auch Milch kühlen an der Glaswand ab und sinken nach unten. Damit kommt eine Kreisbewegung, eine so genannte Konvektion, in Gang: Von der Mitte des Glases strömt warme Flüssigkeit zum Rand, die sich abkühlt, nach unten sinkt und so weiter. Der zusätzliche Einfluss der Konzentration auf die Dichte sorgt dafür, dass die Flüssigkeit nicht bis zum Boden des Glases absinkt, sondern dass sich eine vertikale Abfolge von Konvektionszonen ausbildet. Deren genaue Anzahl ist von den physikalischen Eigenschaften der Flüssigkeit abhängig. Die Konzentration von Espresso in den Schichten nimmt dabei von oben nach unten ab. Dadurch ergibt sich, von der Seite betrachtet, das charakteristische Bild. Da die Bewegung von zwei Faktoren, nämlich Temperatur- und Konzentrationsgefälle, angetrieben wird, spricht man auch von Doppeldiffusion oder doppeldiffusiver Konvektion.

Interessanterweise tritt derselbe Effekt auch im Ozean in der Nähe von Eisbergen auf. Durch das Schmelzen des Eises, das aus Süßwasser besteht, bildet sich in der Umgebung ein Gefälle in der Salzkonzentration aus: Wasser mit niedrigem Salzgehalt ist über solches mit höherem geschichtet. Da das umgebende Wasser wärmer ist als der Eisberg, kühlt es sich an der Eiswand ab und sinkt nach unten. Es kommt zum gleichen Effekt wie beim Latte macchiato – was sich allerdings im Kaffeeglas leichter beobachten lässt. Zumindest ein Weilchen. Am Ende aller Konvektion und Doppeldiffusion bleibt ein physikalisch eher uninteressanter Milchkaffee, der zweifelsohne aber noch geschmacklich seine Reize hat. ◁

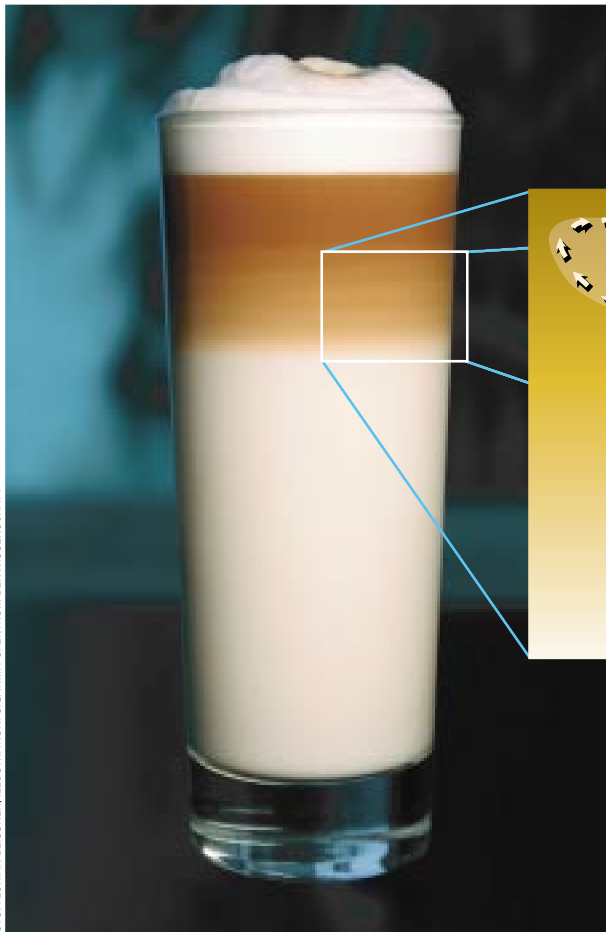
Florian Beißner ist Physiker und arbeitet in Berlin.

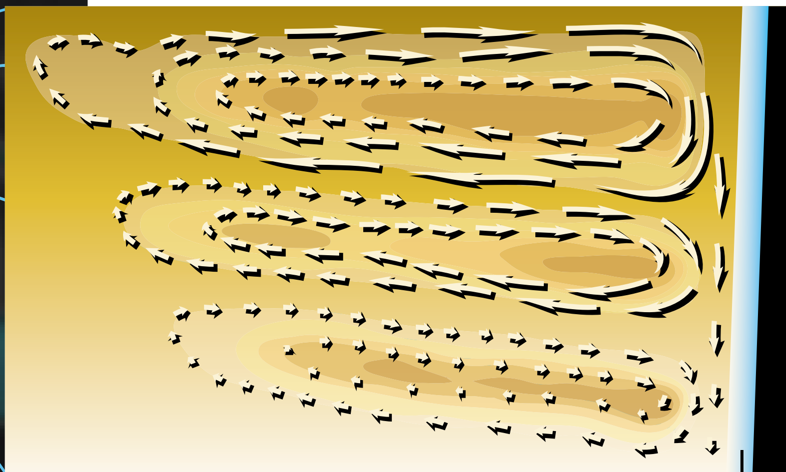
WUSSTEN SIE SCHON?

▶ **Ursprünglich stammt Kaffee vermutlich aus** dem Hochland des heutigen Äthiopiens. Verlässliche historische Quellen existieren jedoch erst ab dem frühen 16. Jahrhundert, als das Getränk in der arabischen Welt schon weit verbreitet war. Durch die Expansion des Osmanischen Reichs gelangte es nach Kleinasien, Syrien, Ägypten und schließlich auch nach Südeuropa. Dort öffnete das erste Kaffeehaus 1645 am Markusplatz in Venedig seine Pforten. 1673 hatte Bremen als erste deutsche Stadt ein Café.

▶ **Pro Jahr trinkt der Deutsche** im Durchschnitt 144 Liter Kaffee, Das entspricht einem Verbrauch von 6,1 Kilogramm Kaffeepulver. Insgesamt wurden im vergangenen Jahr in deutschen Röstereien 502 930 Tonnen rohe Kaffeebohnen zu 16 500 Tonnen löslichem Kaffee und 386 500 Tonnen Röstkaffee veredelt. Bei Letzterem entscheidet vor allem die Stärke der Röstung über die spätere Verwendung als Espresso (dunkle Röstung) oder Filterkaffee (helle Röstung).

▶ **Zur Frage nach den gesundheitlichen Auswirkungen** des Kaffeekonsums haben verschiedene wissenschaftliche Studien in den vergangenen Jahren den Ruf des Getränks weit gehend rehabilitiert. Während ältere Untersuchungen vor allem die Auswirkungen einzelner Inhaltsstoffe, zum Beispiel des anregenden Koffeins, ins Auge fassten, kann dem Kaffee als Ganzem bei maßvollem Verbrauch keine gesundheitsschädliche Wirkung mehr nachgewiesen werden. Er gilt sogar als Quelle für Antioxidantien, die unter anderem Krebserkrankungen vorbeugen können. Insbesondere bei Magen- oder Herzproblemen sollte man dennoch Vorsicht walten lassen.





◀ Die Schichtung eines gut gemachten Latte macchiato entsteht durch Konvektionszellen an der Glaswand.

FOTO: FLORIAN BEISSNER; ILLUSTRATION: SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



NASA / JPL / SSI

Beim Anflug auf Saturn nahm die Raumsonde Cassini 2004 dieses Bild von Phoebe auf, dem ersten bekannten irregulären Mond des Ringplaneten.

Diesen Artikel können 
Sie als Audiodatei beziehen,
siehe: www.spektrum.de/audio

Die seltsamsten Monde des Sonnensystems

Objekte einer kürzlich entdeckten Klasse umlaufen die Riesenplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun auf lang gestreckten und verwickelten Bahnen, oftmals gegen die sonst übliche Richtung. Astronomen lernen daraus Neues über die Frühzeit des Sonnensystems.

Von David Jewitt,
Scott S. Sheppard und Jan Kleyna

Vor fünf Jahren vertrieben sich zwei von uns im Lauf einer bewölkten Nacht im Observatorium auf dem Mauna Kea (Hawaii) mit einer Wette die Zeit: Wie viele Monde warten im Sonnensystem noch auf ihre Entdeckung? Jewitt setzte 100 Dollar darauf, dass selbst ein Teleskop, das auf deren Suche spezialisiert wäre, höchstens zehn neue Monde finden würde. Schließlich hatten Astronomen im gesamten 20. Jahrhundert nur etwa zwei Dutzend neuer Monde entdeckt – die Entdeckungen der Voyager-Raumsonden inbegriffen. Sheppard war optimistischer. Angesichts der wachsenden Empfindlichkeit astronomischer Geräte tippte er auf die doppelte Anzahl.

Inzwischen ist Sheppard um 100 Dollar reicher, denn seit jener Nacht hat allein unser Team 63 neue Monde aufgespürt. Die meisten davon umlaufen ihre Planeten auf lang gestreckten Ellipsen, deren Bahnebenen oft erheblich gegen die Äquatorebene ihrer Planeten geneigt sind. Diese Eigenschaften kennzeichnen sie als »irreguläre Monde« und unterscheiden sie von den regulären Monden, wie den bereits 1610 von Galileo Galilei entdeckten vier Begleitern Jupiters, die diesen Riesenplaneten auf nahezu kreisförmigen Bahnen in seiner Äquatorebene umlaufen.

Streng genommen müssten wir in beiden Fällen von Satelliten sprechen, da der Name Mond für den Erdbegleiter reserviert ist. Doch selbst Astronomen reden so oft von Monden, dass wir diesen Begriff hier ruhig beibehalten können.

Kannten wir vor fünf Jahren im Sonnensystem erst elf irreguläre Monde, so waren es bei Redaktionsschluss dieser Ausgabe bereits hundert. Zwar werden sie durch die Form und Orientierung ihrer Umlaufbahnen definiert, doch fallen sie auch durch die Richtungen auf, in denen sie ziehen. Viele von ihnen bewegen sich retrograd um ihre Planeten, also entgegen deren Rotationsrichtung. Reguläre Monde wie unser Erdbegleiter bewegen sich dagegen immer prograd: Von einem Punkt weit über dem Nordpol aus betrachtet, bewegt sich der Mond auf seiner Bahn gegen den Uhrzeigersinn, und auf dieselbe Weise dreht sich die Erde und umläuft die Sonne.

Vermutlich spiegelt dieses Muster die Drehrichtung der Gas- und Staubscheibe wider, aus der vor 4,5 Milliarden Jahren die Sonne und unser Planetensystem entstanden. Dass reguläre Monde dieser Bewegungsrichtung folgen, lässt Astronomen vermuten, sie seien in den Scheiben um junge Planeten entstanden.

Die entgegengesetzte Bewegungsrichtung der irregulären Monde deutet auf andere Geburtsstätten hin. Vermutlich wurden diese kleinen Objekte in der Frühzeit des Sonnensystems von der Schwerkraft der soeben entstandenen Planeten aus ihren ursprünglichen Bahnen gerissen. Diese Objekte zu untersuchen, könnte neues Licht auf die Frühzeit des Sonnensystems werfen.

Der erste bekannte irreguläre Mond, Neptuns Triton, wurde bereits 1846 entdeckt. Über mehr als anderthalb Jahrhunderte entgingen die meisten seiner Artgenossen den Astronomen, weil sie zumeist kleiner sind und deshalb lichtschwächer erscheinen als ihre regulären Gegenstücke. Außerdem bevölkern sie eine erheblich größere Region des Weltraums.

Bahnen am Rand der Hill-Sphäre

Während Kallisto, der äußerste reguläre Jupitermond, in knapp 17 Tagen den Riesenplaneten im Abstand von 1,9 Millionen Kilometern umläuft, benötigt der noch namenlose irreguläre Mond S/2003 J2 dafür etwa 982 Tage und entfernt sich bis auf 28,5 Millionen Kilometer. Das ist beinahe der Radius der so genannten Hill-Sphäre Jupiters, definiert als der Bereich, den dieser Planet mit seiner Schwerkraft beherrscht. Außerhalb der Hill-Sphäre überwiegt der Schwerkrafteinfluss der Sonne. Von der Erde aus gesehen hat die Hill-Sphäre Jupiters am Himmel ei- ▷

▷ nen Durchmesser von knapp acht Grad. Das ist das Fünfzehnfache des Vollmonddurchmessers – und damit viel größer als das Gesichtsfeld der meisten Teleskope.

Wer eine solche Region nach neuen Monden absuchen will, benötigt neueste elektronische Detektoren und muss pro Nacht bis zu 100 Gigabyte Daten analysieren (siehe Kasten auf S. 52). Unsere eigene Durchmusterung, der »Hawaii Moon Survey«, war zunächst vorrangig Jupiter gewidmet. Dies ist der uns nächstgelegene Riesenplanet, und so können wir in seiner Nähe kleine Monde aufspüren, die in größerem Abstand nicht zu erkennen wären.

Andere Forscherteams unter der Leitung von Brett Gladman von der Universität von British Columbia (Kanada), Matthew Holman vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics sowie J. J. Kavelaars vom Herzberg-Institut für Astrophysik in Victoria (Kanada) nahmen parallel die Suche nach irregulären Monden von Saturn, Uranus und Neptun auf. Das überraschende Ergebnis: Diese vier Riesenplaneten besitzen trotz unterschiedlicher Massen vergleichbare Systeme irregulärer Monde, die jeweils bis zu hundert Objekte mit Größen von mehr als einem Kilometer umfassen könnten.

Irreguläre Monde weisen unterschiedliche Größen auf, doch insgesamt sind die kleinen viel häufiger als die großen. Bei denen Jupiters reicht das Spektrum von der 180 Kilometer großen Himalia bis zu Winzlingen mit Durchmessern von nur ein bis zwei Kilometern.

Nur wenige andere Objekte im Sonnensystem haben so komplizierte Umlaufbahnen wie diese Monde. Da sie sich so weit von ihren Planeten entfernen, zerrt an ihnen sowohl die Schwerkraft des Planeten als auch die der Sonne. Daraus ergibt sich eine Drehung der Ellipsenbahn (Apsidendrehung), sodass sich die Bahnen nicht als geschlossene Kurven darstellen lassen – sie ähneln vielmehr den mit einem Spirografen aufgezeichneten, verwickelten Kurven.

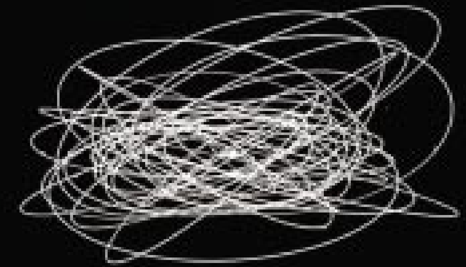
Wirken verschiedene Einflüsse gleichzeitig auf einen Mond ein, wird die Situation noch komplizierter. Stimmt etwa die Periode der Apsidendrehung mit der Umlaufzeit des Planeten überein, so gelangt der Mond in eine Resonanz. Die Schwerkraft der Sonne zerrt stets am gleichen Punkt auf der Umlaufbahn an dem Mond, wodurch sich ihr Einfluss im Lauf der Zeit aufsummiert. Das kann die Bahnellipse immer länger strecken, bis der Mond mit dem Planeten beziehungsweise einem seiner regulären Monde kollidiert oder die Hill-Sphäre verlässt und in eine heliozentrische Umlaufbahn gerät. Dieser Prozess erklärt, warum kein bekannter irregulärer Mond Jupiter näher als sechs Millionen Kilometer kommt.

Sind die Neigung und die Form der Umlaufbahn miteinander gekoppelt, so sprechen Astronomen von einer Kozai-Resonanz. Monde, die in eine stark geneigte Umlaufbahn gezogen werden, landen schließlich in lang gestreckten Ellipsen, was zu ihrer Zerstörung führen oder sie aus der Hill-Sphäre verdrängen kann. Das ist ein möglicher Grund dafür, dass wir keine Monde mit Bahnneigungen zwischen 50 und 130 Grad finden. Heute existierende irreguläre Monde haben vermutlich äußere Schwerkrafteinflüsse überstanden, die viele ihrer Geschwister verschwinden ließen.

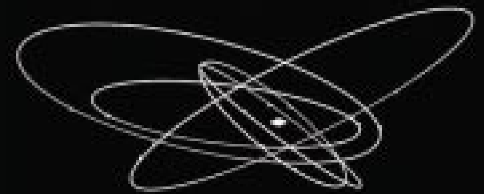
Nicht nur die Bahnverläufe einzelner irregulärer Monde liefern Hinweise auf ihren Ursprung, sondern auch das Auftreten der Monde in Gruppen oder Familien, deren Mitglieder sich in mancher Weise ähneln. Die einfachste Erklärung für ihre Existenz wäre, dass es sich dabei um die Bruchstücke eines größeren Monds handelt, der einer Kollision zum Opfer fiel. Jupiters Gruppen enthalten jeweils bis zu 17 Mitglieder.

Umfangreiche Computersimulationen von David Nesvorny vom Southwest Research Institute in Boulder (Colorado) zeigen, dass die Zahl der Zusammenstöße zwischen Kometen, Monden und anderen interplanetaren Kleinkörpern in den letzten drei bis vier Milliarden Jahren drastisch abgenommen hat. Sind die irregulären Monde durch diesen Prozess entstanden, dann muss es bereits kurz nach der Entstehung des Sonnensystems zu diesen Ereignissen gekommen

Monde auf schiefer Bahn



JUPITER
regulär: 8; irregulär: 55



URANUS
regulär: 18; irregulär: 9



NEPTUN
regulär: 6; irregulär: 7

DON DIXON

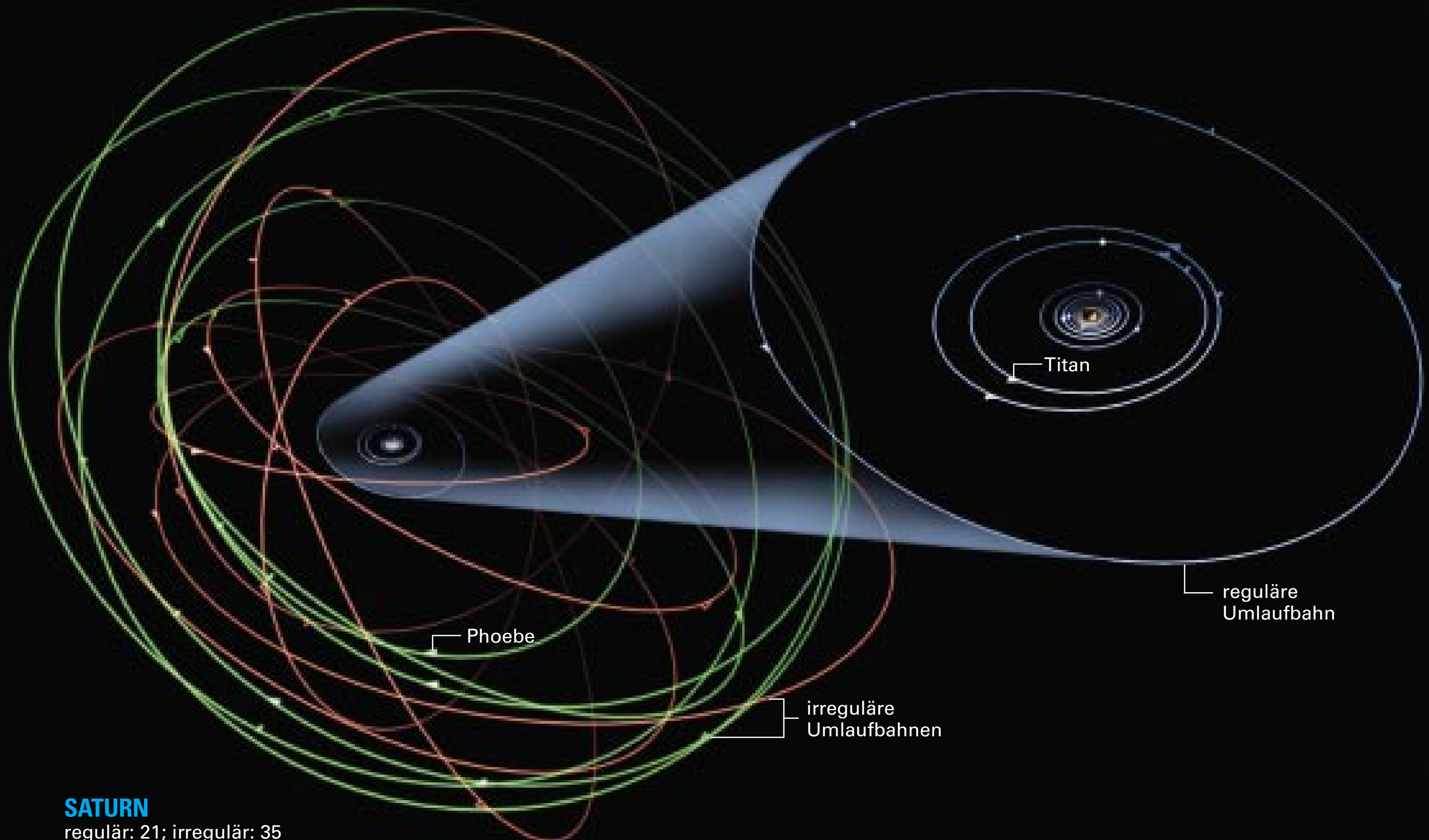
IN KÜRZE

▶ Bis vor wenigen Jahren vermuteten Astronomen, die meisten Monde seien **in Scheiben um ihre Planeten entstanden**, denn sie kreisen in deren Äquatorebene und bewegen sich in derselben Richtung, in der sich ihr Planet um sich selbst dreht. Monde, die nicht in dieses Bild passen, gelten als irregulär.

▶ Neuen Beobachtungen zufolge **bilden irreguläre Monde jedoch die Mehrheit der Monde** im Sonnensystem. Ihre lang gestreckten, verwickelten und gegen die Bahnebene der Planeten geneigten Umlaufbahnen deuten darauf hin, dass sie nicht im Umfeld ihres Planeten, sondern anderswo entstanden.

▶ Vermutlich waren es Kometen und Asteroiden aus dem Kuiper-Gürtel jenseits des Neptuns oder aus dem Innern des Sonnensystems, die **durch Kollisionen oder andere Wechselwirkungen** eingefangen wurden.

Bis vor wenigen Jahren war die Ausdehnung des Mondsystems von Saturn unbekannt. Reguläre Monde (blau) wie Titan und Japetus ziehen ihre Bahn relativ nahe um den Planeten und umlaufen ihn ungefähr in seiner Äquatorebene in gleicher Drehrichtung. Irreguläre Monde wie Phoebe und andere noch namenlose Trabanten sind weiter von dem Planeten entfernt und beschreiben komplizierte Umlaufbahnen. Manche von ihnen bewegen sich entsprechend der Drehrichtung des Planeten (rot), andere jedoch entgegengesetzt (grün).



sein, als noch mehr Kollisionspartner vorhanden waren.

Dass die meisten irregulären Monde so lichtschwach sind, machte es bislang unmöglich, ihre chemische Zusammensetzung aus Spektren zu bestimmen. Einfacher ist es, die Farben ihrer Oberflächen zu messen. Beobachtungen von Tommy Grav von der Harvard-Universität und seinen Mitarbeitern zufolge ähneln sich diese bei den Mitgliedern einer Gruppe stark. Das weist auf deren ähnliche chemische Zusammensetzung hin und spricht für den Verdacht, dass die Mitglieder einer Gruppe Fragmente ein und desselben Ursprungskörpers sind.

Zumindest von drei irregulären Monden wissen wir Genaueres über die Oberfläche. Als die Raumsonde Cassini am 11. Juni 2004 auf ihrem Weg zum Ringplaneten Saturn an dessen Begleiter Phoebe vorbeiflog, sandte sie atemberaubend hoch aufgelöste Bilder zur Erde, die eine kraterübersäte Oberfläche zeigten. Im Spektrum des von der Oberfläche reflektierten Sonnenlichts fanden sich Linien, die auf gefrorenes Wasser und Kohlendioxid hinwiesen.

Rätselhafter Einfang

Fünfzehn Jahre zuvor, im August 1989, war die Raumsonde Voyager 2 an Neptun vorbeigeflogen und hatte Bilder und Spektren von dessen Monden Nereid und Triton aufgenommen, die beide als irregulär bekannt waren. Auch ihre Oberflächen wiesen deutliche Eisspuren auf, was den Verdacht aufkommen lässt, dass sie wie Kometen in recht großem Abstand zur Sonne entstanden.

Dagegen sind Jupiters irreguläre Monde pechschwarz und anscheinend völlig eisfrei. Vermutlich liegt das an ihrer relativen Nähe zur Sonne, in der Eis verdampfen würde. Die irregulären Monde Jupiters erinnern deshalb an tote Kometen, die ihre flüchtigen Bestandteile im Lauf der Zeit verloren haben.

Dieser Vergleich zwischen irregulären Monden und Kometen scheint berechtigt, denn in beiden Fällen handelt es sich vermutlich um Überreste aus der Frühzeit des Sonnensystems, die irgendwie von den Planeten eingefangen wurden. Wie dies genau geschah, bleibt rätselhaft.

Dass die Schwerkraft von Sonne und Planeten Asteroiden und Kometen in kurzlebige Umlaufbahnen um die Riesenplaneten zieht, gehört zum Alltag im Sonnensystem. Ein zeitweiliger Einfang ähnelt kleinen Laubwirbeln an einem Herbsttag: Die Blätter wirbeln vielleicht ▷

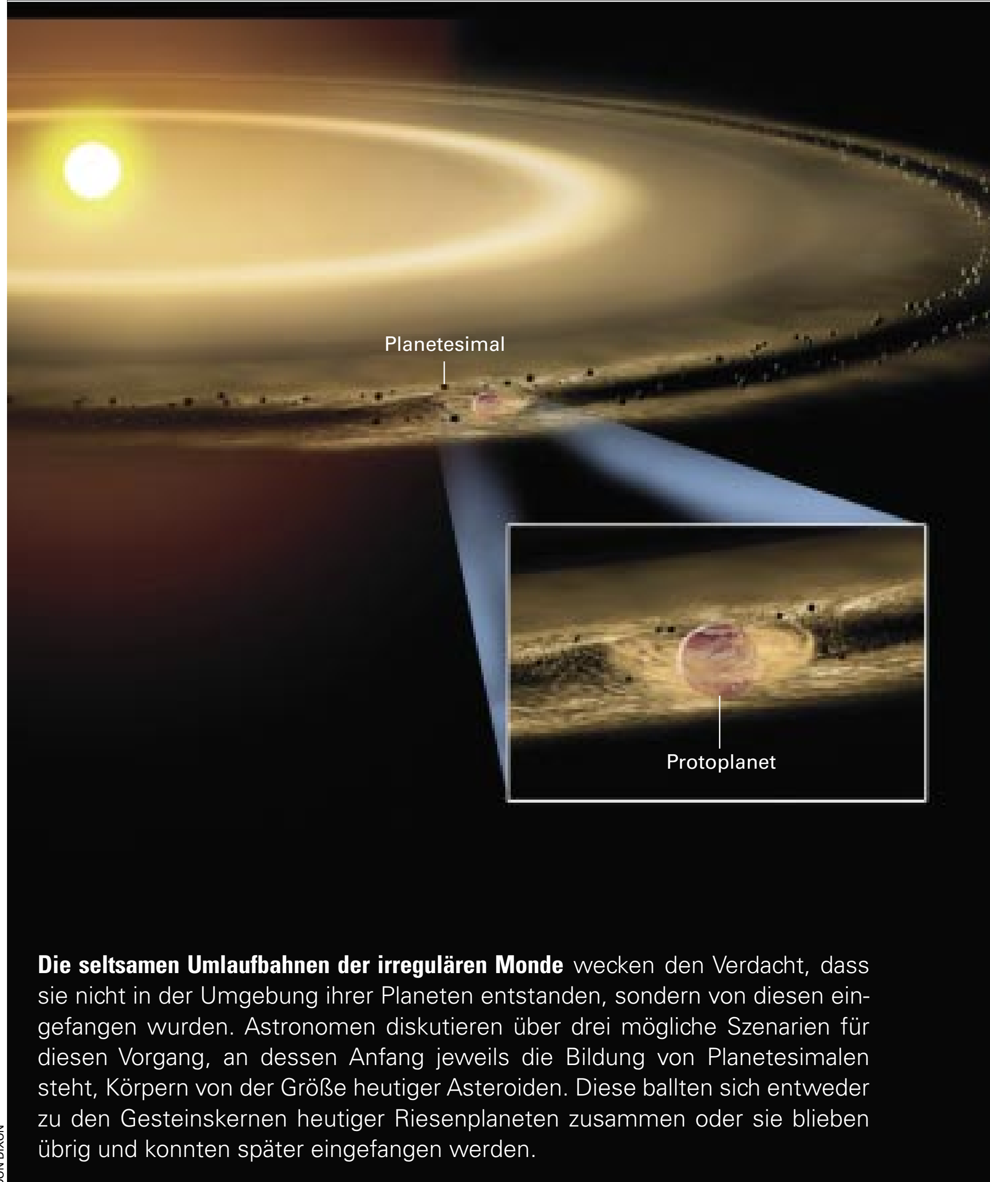
ein Dutzend Mal im Kreis herum, doch dann stieben sie auf unvorhersehbare Art und Weise auseinander.

Ein Beispiel ist der Komet Shoemaker-Levy 9, der irgendwann im 20. Jahrhundert in eine Bahn um den Jupiter einschwenkte und schließlich 1994 mit dem Planeten kollidierte. Hätte es nicht dieses dramatische Ende gegeben, dann wäre der Komet vermutlich nach wenigen hundert Jahren zurück in eine heliozentrische Umlaufbahn geschleudert worden. Inzwischen kennen Astronomen mehrere Objekte, die einen temporären Einfang durch Jupiter überstanden haben und nun wieder die Sonne umkreisen.

Um dauerhaft von einer heliozentrischen Bahn in eine gebundene, stabile Bahn um einen Planeten zu gelangen, muss ein Himmelskörper einen Teil seiner ursprünglichen Energie abgeben. Im heutigen Sonnensystem gibt es dafür keinen wirksamen Mechanismus, und so wurden die Monde vermutlich in der Frühzeit des Sonnensystems eingefangen, als andere Bedingungen herrschten.

Bereits in den 1970er Jahren schlugen Theoretiker drei Mechanismen vor, die damals am Werk gewesen sein könnten.

Wie man einen Mond einfängt



Die seltsamen Umlaufbahnen der irregulären Monde wecken den Verdacht, dass sie nicht in der Umgebung ihrer Planeten entstanden, sondern von diesen eingefangen wurden. Astronomen diskutieren über drei mögliche Szenarien für diesen Vorgang, an dessen Anfang jeweils die Bildung von Planetesimalen steht, Körpern von der Größe heutiger Asteroiden. Diese ballten sich entweder zu den Gesteinskernen heutiger Riesenplaneten zusammen oder sie blieben übrig und konnten später eingefangen werden.

Problematische Gasreibung

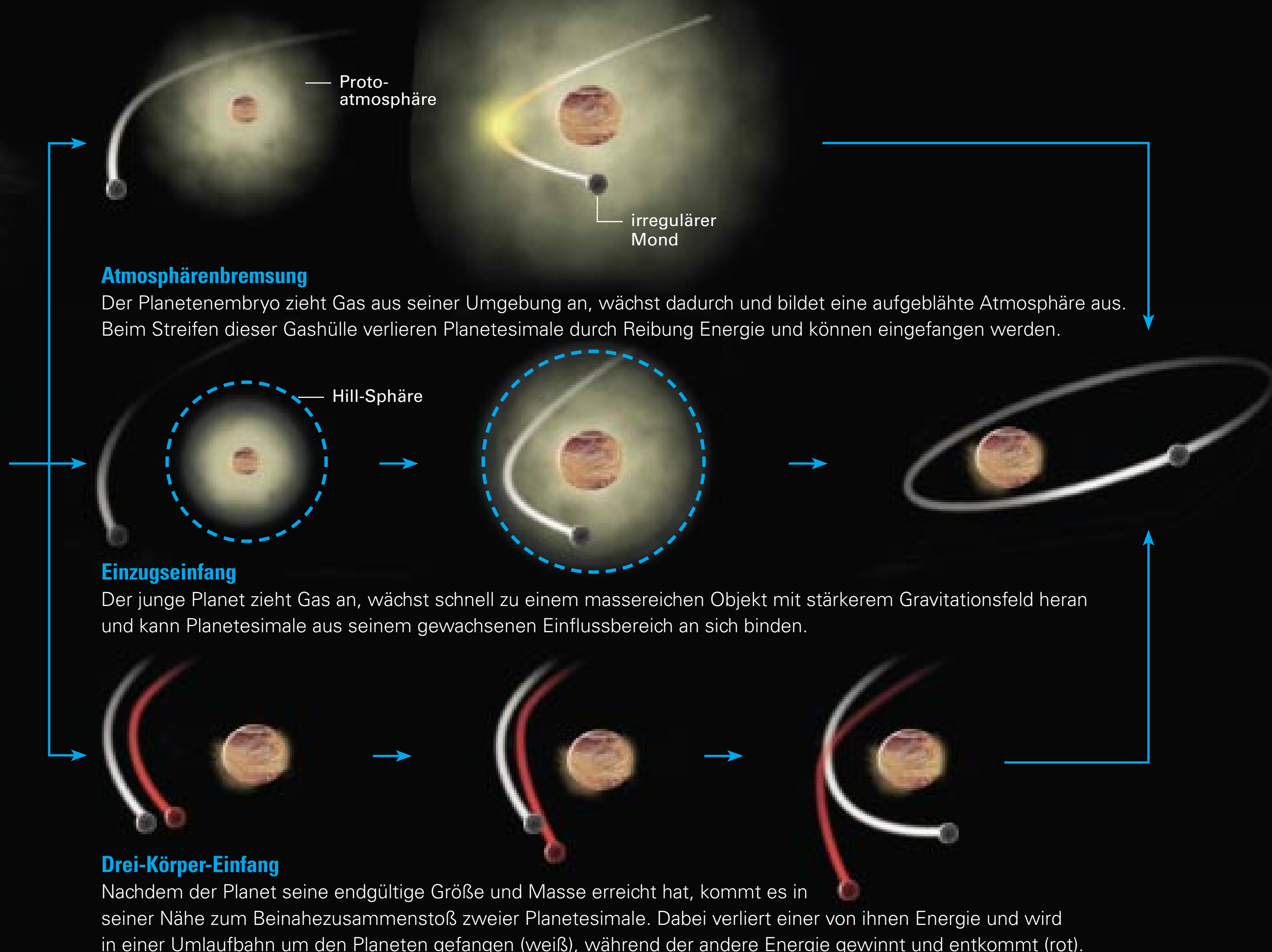
James B. Pollack und Joseph A. Burns vom Ames-Forschungszentrum der Nasa sowie Michael E. Tauber von der Cornell-Universität untersuchten den Energieverlust, der einem Mond durch Reibung in den ausgedehnten Atmosphären der jungen Gasplaneten widerfährt. Im Gegensatz zur Erde und den anderen terrestrischen Planeten bestehen Jupiter und Saturn hauptsächlich aus Wasserstoff und Helium. Wahrscheinlich bildete sich bei diesen Planeten zunächst jeweils ein rund zehn Erdmassen großer Kern aus Gestein und Eis, der große Mengen von Gas aus der Scheibe um die junge Sonne an sich zog. Bevor die Planeten ihre heutige, kompakte Form erreichten, durchliefen sie vermutlich eine Phase, während der ihre Atmosphäre auf das Vielfache ihres heutigen Durchmessers anwuchs.

Was mit einem Kometen oder Asteroiden passiert, der an einem solchen Gasriesen vorüberzieht, hängt von seiner Größe ab. Massearme Kleinkörper verglühen in der ausgedehnten Atmosphäre. Massereiche werden von der Atmosphäre hingegen kaum beeinflusst; sie umkreisen die Sonne weit gehend ungestört. In einem mittleren Größenbereich bremst die Reibung den Himmelskörper jedoch gerade so ab, dass er eingefangen wird. Das ist gewissermaßen eine natürliche Version des »Aerobraking«, das viele Raumsonden nutzen, um in eine Umlaufbahn um ihren Zielplaneten einzuschwenken.

Die Gasreibung erklärt jedoch nicht die Existenz der irregulären Monde um die Eisriesen Uranus und Neptun, die vor allem aus Gestein und Eis sowie Spuren von Wasserstoff und Helium bestehen und die Sonne in größerem Abstand umlaufen. Dort war die Dichte der zirkumsolaren Scheibe zunächst geringer und es dauerte länger, bis die Planetenkerne Gas aus der Umgebung anziehen konnten.

In der Zwischenzeit hatte sich die Gasscheibe um die Sonne jedoch schon weit gehend verflüchtigt. Uranus und Neptun besaßen niemals ausgedehnte Atmosphären, welche passierende Asteroiden oder Kometen durch Reibung hätten abbremsen und einfangen können.

Auch im zweiten Szenario findet der Einfang während der Wachstumsphase der Planeten statt. Die Akkretion von Gas auf die Kerne der späteren Riesenplaneten lässt die Masse rasch anwachsen und damit weiten sich auch die Hill-Sphären um die Planeten aus. Asteroiden und andere Objekte, die sich während dieses schnell ablaufenden Prozesses in der Nähe aufhielten, fanden sich plötzlich im Einflussbereich des planetaren



Atmosphärenbremsung
Der Planetenembryo zieht Gas aus seiner Umgebung an, wächst dadurch und bildet eine aufgeblähte Atmosphäre aus. Beim Streifen dieser Gashülle verlieren Planetesimale durch Reibung Energie und können eingefangen werden.

Einzugseinfang
Der junge Planet zieht Gas an, wächst schnell zu einem massereichen Objekt mit stärkerem Gravitationsfeld heran und kann Planetesimale aus seinem gewachsenen Einflussbereich an sich binden.

Drei-Körper-Einfang
Nachdem der Planet seine endgültige Größe und Masse erreicht hat, kommt es in seiner Nähe zum Beinahezusammenstoß zweier Planetesimale. Dabei verliert einer von ihnen Energie und wird in einer Umlaufbahn um den Planeten gefangen (weiß), während der andere Energie gewinnt und entkommt (rot).

Schwerkraftfelds wieder. Vorgeschlagen wurde dieser Prozess im Jahr 1976 von Thomas A. Heppenheimer und Carolyn Porco am California Institute of Tecnology, die ihn Einzugseinfang *(Pull-down capture)* tauften.

Schicksalsreiche Zusammenstöße

Auch für diesen Mechanismus erweisen sich Uranus und Neptun als Problemfälle, denn vermutlich sind sie langsam angewachsen. Den Modellen zufolge erreichten sie durch die Aufnahme von Asteroiden und Kometen allmählich ihre heutigen Massen, was bis zu einhundert Millionen Jahren gedauert haben kann.

Doch selbst bei Jupiter und Saturn müsste der Prozess innerhalb von Jahrhunderten abgelaufen sein, um den Einfang zu ermöglichen, und das erscheint vielen Experten unrealistisch kurz. Alan Boss von der Carnegie Institution of Washington schlug als Alternative vor, Uranus und Neptun seien ursprünglich genauso massereich gewesen wie Jupiter und Saturn, hätten jedoch anschließend auf Grund der Strahlung naher Sterne im Lauf der Zeit einen Teil ihrer Masse verloren. Die Existenz irregulärer Monde in ihrer Nähe verblüfft, denn ein schrumpfender Planet würde eher Monde verlieren als einfangen.

Bereits 1971 schlugen Bepi Colombo und Fred Franklin vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics ein drittes, völlig unabhängiges Szenario vor. Diesem zufolge könnte bei der Kollision zweier kleiner Himmelskörper in der Hill-Sphäre eines großen Planeten so viel Energie freigesetzt werden, dass einer der beiden kleinen Körper eingefangen wird. Über mehr als drei Jahrzehnte stieß dieser »Drei-Körper-Einfang« auf geringes Interesse, weil derartige Kollisionen im heutigen Sonnensystem sehr selten sind.

Neuere Arbeiten zeigen jedoch, dass gar kein Zusammenstoß nötig ist: Der Prozess funktioniert auch dann, wenn drei Körper über ihre Schwerkraft aufeinander wirken und dabei Energie austauschen. Im Mai dieses Jahres schlugen Craig Agnor von der Universität von Kalifornien in Santa Cruz und Doug Hamilton von der Universität von Mary- ▷

▷ land eine Variante des Drei-Körper-Einfangs vor, bei dem die Schwerkraft eines großen Planeten ein kleineres Doppel-Objekt auseinanderreißt, wobei eines der beiden Objekte weiterfliegt, während das andere eingefangen wird.

Inzwischen ist der Drei-Körper-Einfang für Astronomen besonders interessant, weil er sowohl bei Gas- als auch bei Eisriesen wirksam ist und daher die Existenz irregulärer Monde bei Uranus und Neptun erklären kann. Voraussetzung ist, dass genug Kollisionen oder sehr nahe Vorübergänge in der Nähe des Planeten stattfanden. Am ehesten war das wohl am Ende der Planetenbildung der Fall, als die Hill-Sphäre bereits ihre jetzige Größe erreicht hatte und noch viele Überreste der Planetenentstehung vorhanden waren.

Vielleicht kann der Drei-Körper-Einfang sogar auf elegante Weise erklären, warum alle vier Riesenplaneten ungefähr die gleiche Anzahl von irregulären Monden besitzen: Uranus und Neptun sind zwar masseärmer als Jupiter und Saturn, dafür aber weiter von der Sonne entfernt, und da sich diese Effekte gegenseitig kompensieren, ähneln sich die Größen ihrer Hill-Sphären.

Doch auch wenn der Drei-Körper-Einfang am ehesten die heutigen Aufenthaltsorte der irregulären Monde zu erklären vermag, bleibt deren Ursprung weiter ungewiss. Vielleicht sind es Asteroiden oder Kometen, die in der gleichen Region entstanden sind wie der Planet, der sie später einfing. Die meisten der vor 4,5 Milliarden Jahren vorhandenen Kleinkörper wären dann mit den entstehenden Planeten zusammengestoßen oder aus dem Sonnensystem herausgeschleudert worden – allein die irregulären Monde hätten ihre Umlaufbahn behalten.

Neuere Modelle ergeben ein weiteres Szenario. Dem zufolge war das Sonnen-



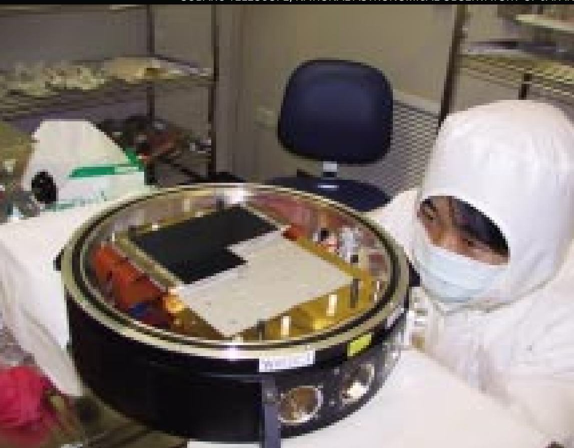
Triton, ein Begleiter Neptuns, ist mit einem Durchmesser von 2700 Kilometern der größte bekannte irreguläre Mond im Sonnensystem. Als erster Vertreter dieser Art wurde er bereits 1846 von dem englischen Amateurastronomen William Lassell entdeckt. Erst beim Vorbeiflug der Raumsonde Voyager 2 gelang es Mitte 1989, Bilder seiner eisbedeckten Oberfläche aufzunehmen, die für einen sonnenfernen Entstehungsort sprechen.

Hill-Sphären im Visier

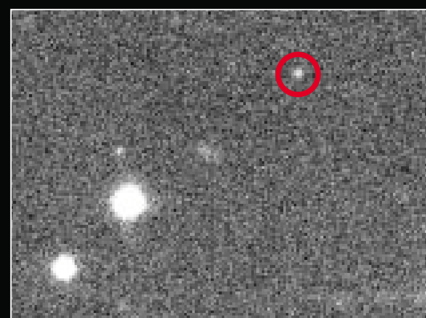
Weit entfernt, klein und lichtschwach: Irreguläre Monde zählen zu den schwierigsten Beobachtungsobjekten im Sonnensystem. Wie Nadeln im Heuhaufen sind sie über einen großen Himmelsausschnitt um ihre Planeten verteilt. Um sie aufzufinden, sind deshalb die modernsten Weitwinkelkameras erforderlich.

Wir haben viele unserer Entdeckungen mit dem Canada-France-Hawaii-Telescope (CFHT) auf dem Mauna Kea in Hawaii gemacht. Der Hauptspiegel des Fernrohrs ist mit einem Durchmesser von 3,6 Metern nach heutigen Maßstäben zwar eher bescheiden, doch dafür ist dieses Gerät mit einem der größten existierenden elektronischen Detektoren ausgestattet: der MegaCam, die mit ihren 268 Millionen Pixeln ein Quadratgrad des Himmels erfasst.

Angesichts der zahlreichen Objekte im Bildfeld dieser Kamera ist es eine Herausforderung, zwischen Objekten im Sonnensystem und zahlreichen, weiter entfernten Sternen und Galaxien zu unterscheiden. Wir verwenden dafür zwei Methoden. Die erste beruht auf einer Entfernungsbestimmung, für die wir drei zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommene Bilder derselben Himmelsregion vergleichen. In diesem Zeitraum hat sich die Erde auf ihrer Bahn um die Sonne weiterbewegt, was unseren Blickwinkel verändert hat. Weit entfernte Objekte sehen wir in nahezu unveränderter Konstellation, doch nahe Objekte wie die irregulären Monde erscheinen vor diesem Hintergrund


SUBARU TELESCOPE, NATIONAL ASTRONOMICAL OBSERVATORY OF JAPAN

▼ Um große Himmelsfelder zu durchmustern, eignet sich diese im Primärfokus des japanischen 8-Meter-Teleskops Subaru installierte Kamera.


D. JEWITT, S. SHEPPARD UND J. KLEYNA



▲ Diese im Abstand von 39 Minuten aufgenommenen Bilder führten am 26. Februar 2003 zur Entdeckung von S/2003 J14, einem irregulären Mond Jupiters (rot), der sich auffällig vor den Sternen und Galaxien im Hintergrund bewegte. Vermutlich ist der Mond etwa zwei Kilometer groß.

system bis etwa 700 Millionen Jahre nach der Bildung der Planeten mit Überresten der Entstehungsphase übersät. Dann wirkten Jupiter und Saturn durch ihre Schwerkraft derart aufeinander ein, dass die resultierenden Schwingungen das gesamte System erschütterten. Milliarden von Asteroiden und Kometen wurden aus ihren Bahnen gerissen, während die großen Planeten ihre heutigen, stabileren Bahnen einnahmen. Ein kleiner Teil dieser umherirrenden Asteroiden und Kometen wurde in dieser Phase von den Riesenplaneten eingefangen.

In diesem Modell, das Kleomenides Tsiganis von der Sternwarte der Côte d'Azur in Nizza und Kollegen von der Universität Rio de Janeiro sowie dem South-West Research Institute in Boulder (Colorado) vorschlugen, entstanden die meisten kleinen Himmelskörper im so genannten Kuiper-Gürtel jenseits der Neptunbahn (siehe Spektrum der Wissenschaft 7/1996, S. 56).

Sobald es gelingt, Spektren des von den irregulären Monden reflektierten Lichts aufzunehmen und daraus auf deren chemische Zusammensetzung zu schließen, wird es möglich sein, diese Szenarien zu überprüfen. Sind die irregulären Monde verschiedener Planeten chemisch unterschiedlich zusammengesetzt, so spräche dies für die erste Hypothese, bei der sie im Umfeld ihrer Planeten entstanden sind. Ähneln sich ihre chemischen Zusammensetzungen jedoch, so spräche dies für das zweite Szenario, in dem sich alle irregulären Monde in der gleichen Region bildeten und erst später zerstreut wurden.

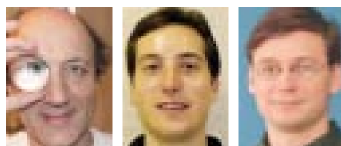
Aus Beobachtungen der irregulären Monde könnten wir dann lernen, ob das Sonnensystem einst eine turbulente Neuordnung der Planetenbahnen durchgemacht hat. Wie Bremsspuren auf einer Straße nach einem Autounfall verraten sie uns etwas über eine Geschichte, die wir selbst nicht miterleben konnten. ◁

verschoben – und zwar umso stärker, je näher sie uns sind.

Die zweite Methode nutzt Geschwindigkeitsmessungen. Zunächst nehmen wir in relativ kurzem Abstand mehrere Dutzend Bilder einer Himmelsregion auf. Anschließend überlagern wir diese Bilder, verschieben sie jedoch leicht gegeneinander, und zwar entsprechend der zu erwartenden Bahngeschwindigkeit der von uns gesuchten irregulären Monde. Auf der Überlagerung erscheinen die Hintergrundsterne als Striche und die irregulären Monde als helle Punkte. Da diese Methode mehr Aufnahmen einer Himmelsregion nutzt, ist sie zum Auffinden lichtschwacher Objekte geeigneter als die erste. Dafür dauert die Durchführung einer kompletten Durchmusterung länger.

Um sicherzugehen, dass wir tatsächlich Monde gefunden haben und nicht etwa Asteroiden oder Kometen, überwachen wir sie mehrere Monate lang und überprüfen so, ob sie wirklich um ihren jeweiligen Planeten kreisen.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE



David Jewitt, **Scott S. Sheppard** und **Jan Kleyna** (v. l. n. r.) gehören zu den weltweit erfolgreichsten Entdeckern neuer Monde. Jewitt begann im Alter von sieben Jahren, sich für Astronomie zu interessieren, als er in London einen spektakulären Meteorschauer sah. Er ist jetzt Professor für Astronomie an der Universität von Hawaii. Sheppard begann seine wissenschaftliche Laufbahn als Student von Jewitt und ist gegenwärtig Postdoktorand an der Carnegie Institution of Washington. Kleyna ist Postdoc an der Universität von Hawaii.

A survey for »normal« irregular satellites around Neptune: Limits to completeness. Von Scott S. Sheppard, David Jewitt und Jan Kleyna in: Astronomical Journal, Bd. 132, S. 171, 2006

Cassini imaging science: Initial results on Phoebe and Iapetus. Von Carolyn Porco et al. in: Science, Bd. 307, S. 1237, 2005

Irregular satellites in the context of planet formation. Von David Jewitt und Scott Sheppard in: Space Science Reviews, Bd. 114, S. 407, 2004

The discovery of faint irregular satellites of Uranus. Von J. J. Kavelaars et al. in: Icarus, Bd. 169, S. 474, 2004

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Winziges Energiepaket

Schwerpunkt Nanotechnologie

Im Vergleich zu Mikrochips wirken Batterien wie klobige Relikte aus den Urzeiten der Elektronik. Nanotechnik soll dem bald abhelfen.

Von Charles Q. Choi

Seit der Erfindung des Transistors sind fast sechzig Jahre vergangen. Doch vergleicht man den etwa 2,5 Zentimeter breiten Stammvater mit seinen Millionen Nachfahren auf einem heutigen Computerchip, scheinen Äonen vergangen. Für Batterien, die mobile elektronische Geräte mit Strom und Spannung versorgen, fällt dieser Vergleich weit weniger schmeichelhaft aus. Denn während Transistoren auf ein Hunderttausendstel ihrer Größe schrumpften, werden die Abmessungen der Ladungsspeicher noch in Zentimetern gemessen.

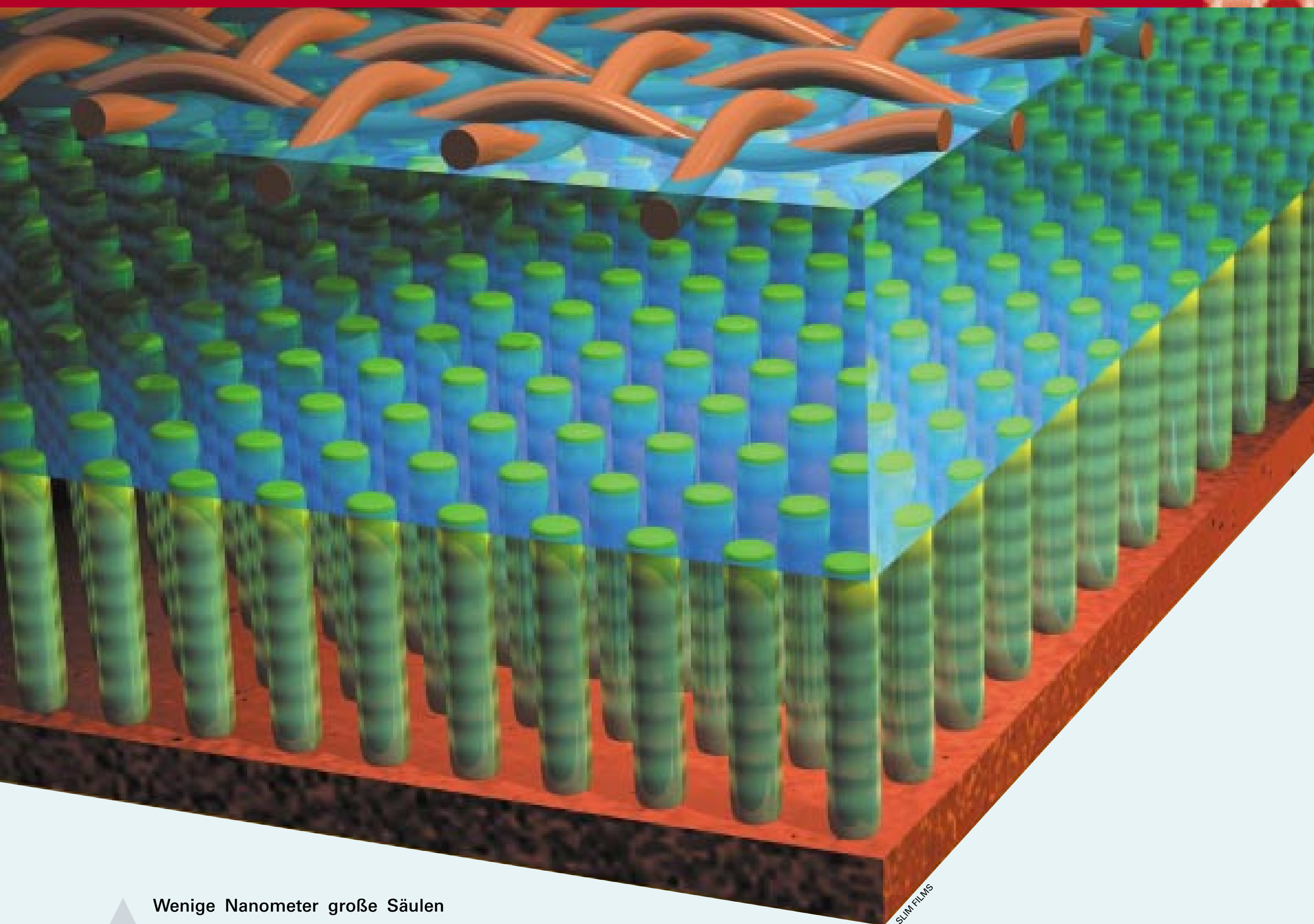
Das Konzept des Transistors wurde in den Bell Laboratories geboren. Inzwischen bilden die »Bell Labs« die Ideenschmiede des Netzwerkgiganten Lucent Technologies und sind längst nicht mehr auf den Firmensitz in Murray Hill (New Jersey) beschränkt. Obwohl elektrische Energiespeicher eigentlich nicht das Geschäft dieses Unternehmens sind, hat Bell Labs nun beschlossen, die Batterie neu zu erfinden. Abmessungen im Nanometerbereich und eine Massenfertigung mit den Verfahren der Halbleiterindustrie, so lauten die ehrgeizigen Ziele. Dann nämlich lassen sich die Speicher in die Schaltungen integrieren, also gemeinsam mit den Transistoren fertigen. Allerdings denken die Wissenschaftler dabei nicht an eine permanente Stromversorgung von Mikrochips, sondern an Systeme, die auf ein Signal hin erwachen und rasch Energie freisetzen. Netzwerke von Sensoren zur Überwachung von Atomanlagen oder Mülldeponien wären eine mögliche Anwendung, auch massenhaft gefertigte Sensoren für Giftgase, die von Flugzeugen über Kampfgebieten abgeworfen würden. Sobald der Alarmfall eintritt, soll ein solcher Messfühler ein Signal senden. Dazu benötigt er eine Stromversorgung, die lange auf ihren Einsatz warten kann – mindestens 15 Jahre sollen die neuen Nanobatterien ruhen können, ohne an Ladung zu verlieren.

Kontaktscheue Linsen

Die entscheidende Idee hatte Tom Krupenkin, der bei Bell Labs über flüssige Mikrolinsen forschte, wie sie inzwischen in vielen Fotohandys zu finden sind. Diese Linsen verändern ihre Form und damit ihre Brennweite, wenn sich die Benetzbarkeit ihrer Kontaktfläche ändert: Ist sie »hydrophil«, breitet sich die Flüssigkeit darauf aus, ist sie aber »superhydrophob«, versucht die Linse sozusagen, den Kontakt zu vermeiden und ballt sich zur Kugel. Der jeweilige Zustand lässt sich elektrisch umschalten, ein Effekt, den man *electrowetting* nennt. Freilich muss die Flüssigkeit dazu Strom leiten können. Die Steuerspannung wird über eine Elektrode hinter dem Substrat appliziert, das seinerseits aus einem Isolator besteht.

Krupenkin überlegte nun, auf diese Weise auch winzige chemische Reaktoren zu bauen. Er ersann eine Anordnung dicht stehender Reihen nur wenige Nanometer hoher »Säulen«, deren Oberfläche von superhydrophob auf hydrophil zu schalten sein sollte. Solange sie sich im ersteren Zustand befinden, würden flüssige Reagenzien winzige Tropfen bilden, die in den Lücken zwischen den Säulen verharren. Schaltet man ihre Oberflächen auf hydrophil, müssten Kapillarkräfte die Tröpfchen zwischen den Säulen auf den Boden ziehen – wo diese mit dort wartenden Substanzen in Kontakt kämen. Krupenkin erkannte das Potenzial, auf diese Weise erstmals eine Nanobatterie zu realisieren.

Eine typische Einwegbatterie besteht aus Anode und Kathode, eingetaucht in einen Elektrolyten. Der vermittelt eine chemische Reaktion zwischen den beiden Elektroden, dabei werden Elektronen ausgetauscht – es fließt Strom. Solange kein Verbraucher angeschlossen ist, sollte die elektrochemische Reaktion unterbleiben. Tatsächlich verliert eine Batterie pro Jahr etwa sieben bis zehn Prozent der gespei-



Wenige Nanometer große Säulen aus Silizium bildeten das Ausgangsdesign für ein völlig neuartiges Batteriekonzept, bei dem der Elektrolyt von der Kathode ferngehalten wird, bis die jeweilige Anwendung Energie benötigt.

cherten elektrischen Energie. Dies können Barrieren zwischen Elektroden und Elektrolyten zwar verhindern. Doch das macht solche Ladungsspeicher voluminös, sie werden deshalb nur als Notfallreserve etwa auf Intensivstationen oder in militärischen Systemen eingesetzt.

Krupenkins Konzept bot dazu eine echte Alternative. »Lucent Technologies ist eigentlich in diesem Marktsegment nicht tätig, wir würden aber dennoch gern die Batterietechnik revolutionieren«, erklärte David Bishop, stellvertretender Leiter der Nanoforschung bei Bell Labs. Geeignete Partner fand er bei einer Präsentation vor drei Jahren. Das ebenfalls in New Jersey ansässige Unternehmen mPhase fertigte vor allem Komponenten für den Breitband- und Video-DSL-Markt für Privatkunden, suchte aber nach Möglichkeiten, in der Nanotechnologie Fuß zu fassen. Dabei war allerdings klar, dass jegliche Aktivität drei Kriterien genügen müsste: keine lange Entwicklungszeit, mögliche militärische Anwendungen, geringe Kosten in der Anlaufphase.

Die Nanobatterien erfüllten offenbar alle diese Anforderungen und im Februar 2004 unterzeichneten die beiden Unternehmen einen Kooperationsvertrag. mPhase begann sogleich, die Erwartungen potenzieller Kunden zu eruieren. Lucent stellte Lizenzen, einen 450 Millionen Dollar teuren Reinraum sowie Kontakte zu Halbleiterexperten zur Verfügung.

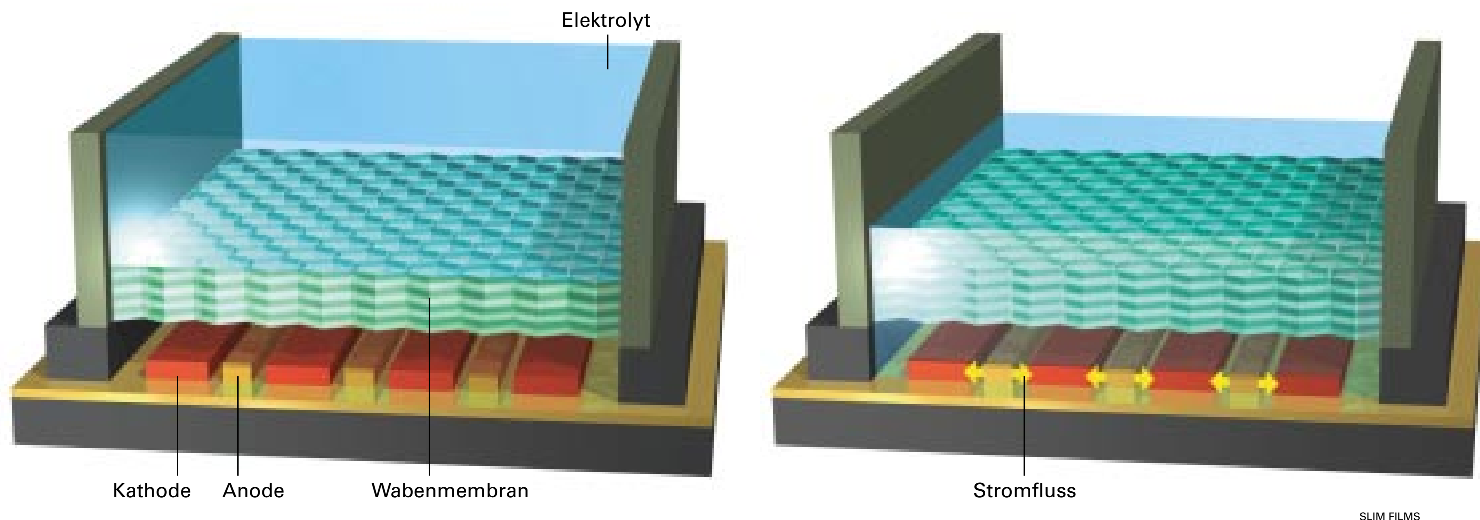
Im September darauf präsentierten die Forscher bereits einen funktionsfähigen Prototyp in Sandwichbauweise. Zur Stromerzeugung nutzten sie Verbindungen, wie sie in den weit verbreiteten Alkali-Mangan-Batterien verwendet werden: eine Kathode aus Mangandioxid (so genannter Braunstein) und eine Anode aus Zink. Beide bildeten den Deckel beziehungsweise den Boden des Sandwichs. Dazwischen sollten 350 Nanometer breite, sieben Mikrometer hohe und im Abstand von etwa zwei Mikrometern platzierte Siliziumsäulen eine Zinkchlorid-Lösung zwischen den Elektroden auf Widerruf separieren. Dazu wurden die Spitzen der Säulen mit Fluorkohlenstoff überzogen, dessen Benetzbarkeit sich durch eine Steuerspannung einstellen lässt. Der Rest der Säulen wurde mit Siliziumdioxid elektrisch isoliert.

Problematischer Bodendecker

Doch auf dem Boden Zink abzuscheiden, erwies sich als schwierig. Das Standardverfahren zur Metallisierung von Oberflächen ist das Galvanisieren: Das zu beschichtende Objekt wird an den Minuspol ▷

Design einer Nanobatterie

Eine Wabenmembran aus Silizium separiert im aktuellen Prototyp den Elektrolyten von den nebeneinander angeordneten Elektroden (links). Auf diese Weise unterbleibt jegliche chemische Reaktion, bis eine Steuerspannung die Membran durchlässig macht und die Batterie Strom liefert (rechts).



▷ einer Spannungsquelle angeschlossen, eine Metallanode löst sich im Elektrolyten und schlägt sich am fraglichen Ort nieder. Dazu musste der Boden freilich elektrisch leiten können. Doch bei der Fertigung bildete sich auch dort Siliziumdioxid. Es gelang den mPhase-Entwicklern, diese Oxidschicht so dünn zu machen, dass ionisiertes Gas es wegätzen konnte, während die Säulen noch ausreichend bedeckt blieben.

Alles auf Anfang!

Im nächsten Schritt wurde in einem nasschemischen Verfahren Nickel oder Titan auf dem Boden abgeschieden. Erst darauf konnte dann die Zinkschicht aufwachsen. Das sollte natürlich so gleichmäßig wie möglich erfolgen. Es durfte sich also weder lokal Zink anhäufen noch an anderer Stelle fehlen. In vielen Testreihen entdeckten die Forscher die optimale Kombination von Temperaturen, Konzentrationen und Stromstärken. »Rückwirkend betrachtet wundert es mich, dass wir dafür nur ein Jahr gebraucht haben«, bekundet Steve Simon, stellvertretender Forschungsleiter bei mPhase.

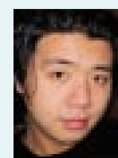
Doch als die Forscher ihren Prototyp potenziellen Kunden präsentierten, begann die Arbeit von vorn. Denn insbesondere Angehörige des Militärs äußerten sich kritisch über das Sandwichdesign. Es störte sie, dass der Elektrolyt permanent Kontakt zur oben liegenden Kathode hatte, unerwünschte chemische Reaktionen seien da nicht auszuschließen. Inzwischen bildet er die oberste Lage eines neuen Sandwichs – eine wabenartige Nanostruktur trennt ihn von den inzwischen nebeneinander auf dem Boden angeordneten Elektroden (siehe Bild oben).

Dementsprechend haben sich die Entwickler auch von der Säulenstruktur verabschiedet. Sie bietet zwar ein Maximum an Reaktionsoberfläche bei einem Minimum an Platzbedarf. Doch ihre Fertigung erwies sich ohnehin als sehr diffizil. Die Poren der Siliziumwaben sind zwanzig Mikrometer weit, die Wände 0,6 Mikrometer dick. Sie werden aus einem Wafer geätzt, danach wächst Siliziumdioxid in einem 1000 Grad Celsius heißen, von Sauerstoff durchströmten Ofen auf. Abschließend wird die gesamte Wabe mit Fluorkohlenstoff beschichtet.

Die ersten Prototypen gelangen im Oktober 2005. Ein großer Vorteil der neuen Struktur: Um neue Anoden-Kathoden-Kombinationen zu testen, muss nicht erst aufwändig ermittelt werden, wie sich die Anodenschicht zwischen Nanosäulen abscheiden lässt. Bell Labs und mPhase arbeiten zurzeit gemeinsam mit der Rutgers University, der Staatsuniversität von New Jersey, daran, lithiumbasierte Nanobatterien für Digitalkameras und Handys zu entwickeln. Es gibt viele Ideen, wie diese Technik zu nutzen sei.

So könnten weitere Chemikalien den Elektrolyten nach Gebrauch wieder neutralisieren. Gerade bei Netzen von Umweltsensoren wäre das eine wichtige Anforderung. Statt Silizium ließe sich vielleicht auch ein Kunststoff verwenden, um die Nanobatterien zudem flexibel zu machen. mPhase und BellLabs haben zudem ein mikromechanisches Magnetometer entwickelt, das in mehr als zehn Meter Entfernung eine Eisenstange aufspüren kann, dabei kommt auch die Nanobatterie zum Einsatz. Dieses System könnte die Sicherheit im zivilen Luftverkehr erhöhen, wird aber wohl zunächst vor allem militärische Anwendungen finden. Die Firma mPhase rechnet damit, in zwei bis drei Jahren Muster an potenzielle Kunden versenden zu können. ◁

AUTOR UND LITERATUR



Der Journalist **Charles Q. Choi** ist Mitarbeiter von United Press International und Experte in Sachen Nanotechnologie.

From rolling ball to complete wetting: the dynamic tuning of liquids on nanostructured surfaces. Von T. N. Krupenkin, J. A. Taylor, T. M. Schneider und S. Yang in: Langmuir, Bd. 20, S. 3824, 11. Mai 2004

A novel battery architecture based on superhydrophobic nanostructured materials. Von A. Lifton und S. Simon. Im Internet unter: www.mphasetech.com/nanobattery-architecture.pdf

KOMMENTAR



Wiener Schnitzel aus der Atomfabrik?

Diesseits utopischer Prophezeiungen mausern sich Rastersondenmikroskope zu wichtigen Werkzeugen.

Von Bernd Müller

Es ist gut zehn Jahre her: Auf der vierten Foresight Conference über molekulare Nanotechnologie in Palo Alto präsentierte ein Physiker namens Eric Drexler winzige Maschinen aus wenigen hundert oder tausend Atomen, die Atome transportierten, zusammensetzten und Kopien von sich selbst schufen. Eines Tages würden diese so genannten Assembler beliebige Gegenstände – vom Auto bis zum Wiener Schnitzel – wie aus Legosteinen aufbauen, versprach Drexler. Das Publikum verehrte ihn wie einen Messias. Der Haken an der Sache: Die Molekülmaschinen waren eine Computeranimation und sind auch heute noch nicht mehr als ein Hirngespinst.

Dabei klang Drexlers Argumentation plausibel: Auch die Natur arbeitet mit molekularen Maschinen. Und Anfang der 1990er Jahre war es Don Eigler vom IBM-Forschungslabor in Almaden gelungen, mit der Nadelspitze eines Rastertunnelmikroskops einzelne Atome auf Oberflächen zu bewegen und so Bilder und Buchstaben zu kreieren – Nanotechnik schien zum Greifen nahe. Doch schaut man heute auf die Internetseiten von Drexler und Eigler, stehen dort dieselben Bilder wie vor zehn Jahren. Nichts Neues also bei Rastersondenmikroskopen und Assemblern?

Der Schein trügt: »Die Rastersondenmikroskopie hat in den letzten Jahren große Durchbrüche erlebt«, erklärt Roland Wiesendanger von der Universität Hamburg, der diesem Forschungsgebiet wichtige Impulse gegeben hat. Allerdings habe die Öffentlichkeit das nach der anfänglichen Euphorie kaum wahrgenommen. Tatsächlich sind beispielsweise Rasterkraftmikroskope näher an der Anwendung als damals, nur eben anders als Drexler dachte, zum Beispiel als Analysewerkzeuge in der Molekularbiologie.

Vor allem Atomkraftmikroskope haben sich gemausert. Sie bestehen aus einer 50 bis 500 Mikrometer langen Blattfeder, die eine wenige Mikrometer kurze Spitze trägt; ein an der Feder reflektierter Laserstrahl misst noch so winzige Auslenkungen. Fährt man damit über eine Oberfläche, ergibt sich eine Art atomare Landkarte, bewegt sich die Nadel in Querrichtung, verdreht sich die Feder auf Grund der Reibung. Eine Variante des Prinzips versetzt die Nadel in Schwingung, das Gerät misst dann die Elastizität der Oberfläche.

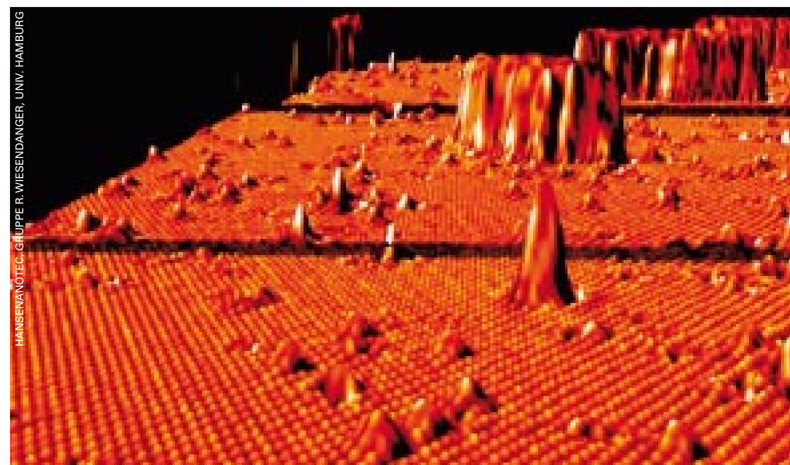
Führend in der Rasterkraftmikroskopie sind nicht mehr die USA oder Europa, sondern Japan. Dort gelangen die beiden aufsehenerregendsten Entwicklungen der letzten Zeit. Toshio Ando von der Universität Kanazawa filmte die Dynamik einzelner Moleküle in einer Lösung, jedes Einzelbild wurde in jeweils zwanzig Millisekunden mit einer Sonde aufgenommen. Die Nadelspitze deformiert allerdings die Moleküloberfläche etwas, sodass die Auflösung nur einige Nanometer beträgt – zu grob, um auch die einzelnen Atome zu sehen. Doch innerhalb der nächsten Jahre dürfte dieses Problem gelöst sein: Varianten des Verfahrens arbeiten ohne Oberflächenkontakt, indem sie die schwachen Kräfte zwischen Spitze und Oberfläche messen.

In Don Eiglers Fußstapfen trat Seizo Morita von der Universität Osaka. Er nutzt Rasterkraftmikroskope, um Atome auf Oberflächen zu manipulieren. Doch nicht nur auf metallischen Oberflächen wie der IBM-Forscher, sondern auch auf Halbleitern. Damit eröffnet sich ein riesiges Anwendungspotenzial. Automatisierte Mikroroboter, die auf der Nanoskala Computerchips zusammensetzen, scheinen auf jeden Fall möglich.

Bevor Produkte auf den Markt kommen, die mittels Rasterkraftmikroskopen hergestellt wurden, werden diese selbst Teil von Konsumartikeln sein. Beispiel Computerfestplatten: Ihre Speicherdichte steigt rasant und damit schrumpfen die magnetischen Inseln, die einzelne Bits repräsentieren. Heute sind sie noch zweihundert Nanometer breit und zwanzig Nanometer lang; über kurz oder lang müssen wenige Atome für das Speichern genügen. Dann benötigt man aber andere Schreib-Lese-Köpfe als bisher. An der Universität Hamburg werden bereits neuartige Magnetkraftmikroskope mit speziellen Spitzen betrieben, die magnetische Eigenschaften eines Materials bis zur Auflösung einzelner Atome messen können (siehe Bild).

Die Japaner haben in den 1990er Jahren enorme Summen in die Nanoforschung investiert. Der Erfolg gibt ihnen Recht. Deutschland und die Europäische Union scheinen das Versäumte nun nachholen zu wollen und stecken inzwischen Milliarden in dieses Gebiet. Doch Insider sind enttäuscht: Das Geld fließt hier zu Lande großteils in traditionelle Technologien wie die Mikrochipfertigung und die Materialforschung, die sich die Vorsilbe »Nano« zu Nutze machen, um leichter an Fördergelder zu kommen. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft und der Wissenschaftsrat scheinen das erkannt zu haben: In der Exzellenzinitiative von Bund und Ländern haben es nur drei »echte« Nanoforschungsverbünde in die zweite Runde des Exzellenzcluster-Wettbewerbs geschafft.

Der Journalist **Bernd Müller** hat schon alle »Großen« der Rastersondenszene wie Don Eigler oder den Nobelpreisträger Gerd Binnig interviewt.



Mit neuartigen spinpolarisierten Rastertunnelmikroskopen lassen sich nanoskalige magnetische Eiseninseln auf einer antiferromagnetischen Atomlage sichtbar machen.



Lotuseffekt am seidenen Faden

Damit Kleidung länger sauber bleibt und dennoch strapazierfähig, setzen Schweizer Forscher die Fasern einem Plasma aus.

Von Dirk Hegemann

Wenn Materialwissenschaftler von neuen Verfahren zur Veredlung von Fasern schwärmen, lautet die erste Frage von Textilherstellern: »Und wie sieht es mit der Waschbeständigkeit aus?« Was nutzt eine schmutzabweisende Oberfläche, wenn sie schon nach wenigen Waschgängen im Spülwasser verschwindet? Dabei sind weniger die Attacken der Waschmittel das Problem, sondern vor allem die Reibung der Kleidungsstücke aneinander.

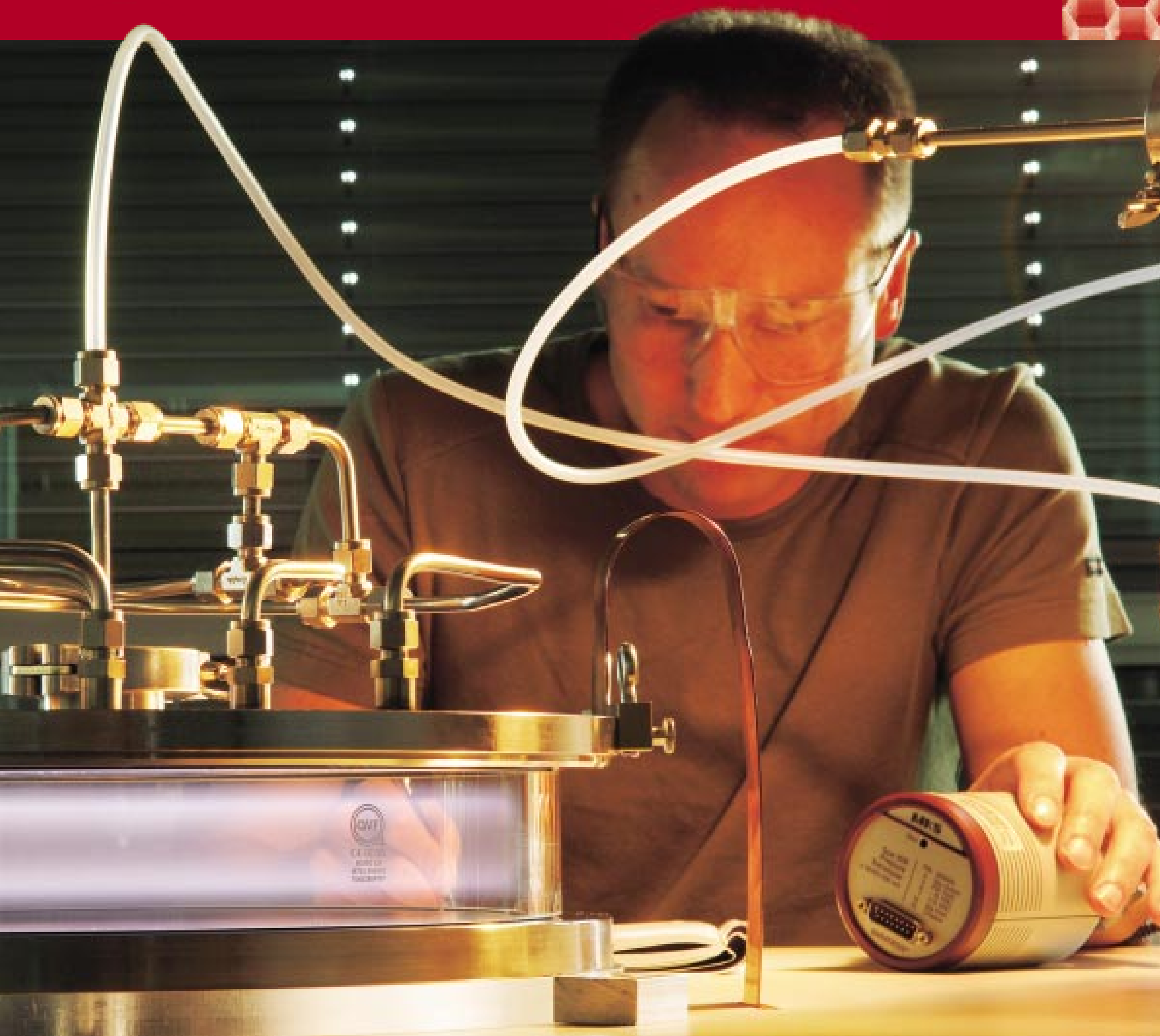
Der Schutz gegen Schmutz ist eine Frage der Benetzbarkeit: Die meisten Verunreinigungen kommen in mehr oder weniger flüssiger Form auf die Fasern wie Öl, Salatsoße, Ketschup oder Rotwein. Je enger sie mit der Oberfläche in Kontakt treten und sie benetzen, desto tiefer kann die Verschmutzung ins Textil eindringen. Fluorkohlenstoffe sind schlecht benetzbar und werden daher zur Veredlung textiler Fasern eingesetzt. Je mehr Fluor in die Beschichtung eingebaut werden kann, desto geringer wird somit die Benetzbarkeit und desto besser wird Schmutz abgewiesen. Andererseits mindert ein hoher Fluoranteil die Fähigkeit der Kohlenstoffatome, die Schichten untereinander zu vernetzen und so mechanisch zu stabilisieren.

Zum Glück muss nicht jede Textilveredlung die Waschmaschine überstehen. Manager schätzen es, wenn sie nach einem Geschäftsessen den Soßenfleck mit einer Serviette wegsaugen oder unter einem Wasserhahn einfach abspülen können. Hier stellt sich eher das Problem, dass eine Schutzschicht die Glanzeffekte und den typischen Seidengriff nicht beeinträchtigen darf. Das erfordert Schichtdicken der Veredlung von weniger als zweihundert Nanometern. Mit Fluorkohlenstoff lässt sich das bereits erreichen. Doch edle Seidenkrawatten sind eher die Ausnahme, es wäre wünschenswert, die schmutzabweisende Ausstattung von Alltagskleidung mit einer Waschbeständigkeit verbinden zu können.

Kresse und Kohl

Die Natur macht es vor: Auch das Blatt der Lotusblume, der Kapuzinerkresse oder des Kohls ist schwer benetzbar. In den Zwischenräumen der noppenartigen, wächsernen Oberflächenstruktur ist Luft eingeschlossen, sodass wässrige Flüssigkeiten nicht eindringen können und sich zu Tropfen ballen, die dann abrollen und Schmutzpartikel mitreißen. Doch diese feinen Strukturen im Mikro- und Nanometerbereich brechen leicht ab. Die Natur löst das Problem einfach: Die Noppen wachsen nach. Für künstliche Oberflächen aber müssen andere Lösungen gefunden werden.

Mitunter sollen sich Fasern jedoch gerade gut benetzen lassen, zum Beispiel um Stoffe zu bedrucken. Auch hier ist es um die Beständigkeit der Beschichtung nicht gut bestellt, da entsprechende chemische Funktionsgruppen aus den Oberflächen herausragen und deshalb mechanisch wie chemisch angreifbar sind. Eine mögliche Lösung wären wieder Nano-



EMPA, ST. GALLEN

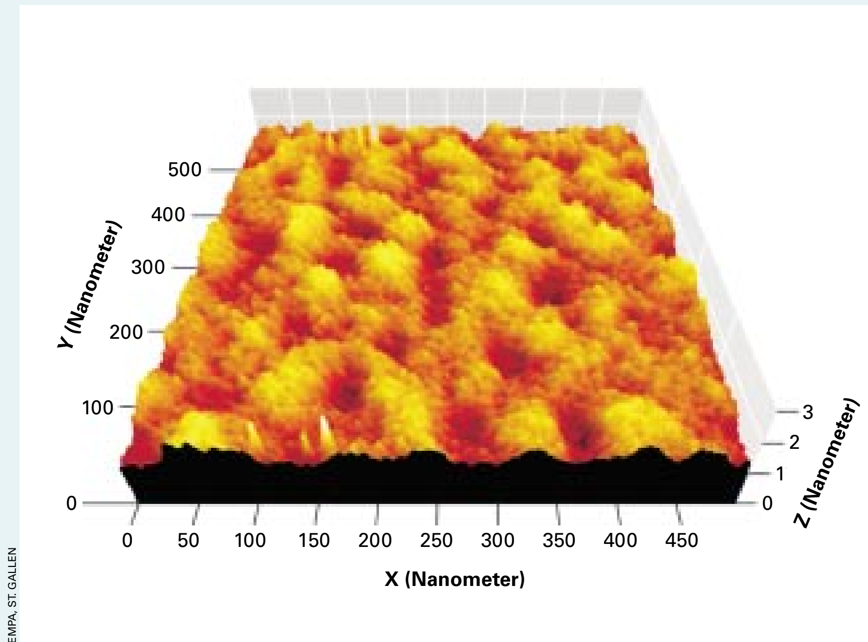
Ästhetik im Labor: Das Niederdruckplasma leuchtet in der Versuchskammer, Experimentator ist der Autor.

strukturen, nur dass sie nicht aus Noppen, sondern aus Vertiefungen bestehen müssten. Eine solche nanoporöse Oberfläche wäre auch sehr viel größer und böte damit den Farbstoffen mehr Kontaktfläche. Zudem lässt sie sich als hochvernetzte und damit sehr stabile Matrix realisieren, in deren Poren funktionelle Gruppen eingebracht werden können.

Eine elegante Methode, dergleichen herzustellen, bietet die so genannte Niederdruckplasma-Technologie, die zunehmend nasschemische Prozessschritte umweltfreundlich ersetzt. Dabei werden in einer elektrischen Gasentladung, dem so genannten kalten Plasma, Elektronen, Ionen, angeregte Teilchen und Radikale sowie energiereiche UV-Strahlung erzeugt und dann zur Modifikation von Materialoberflächen genutzt. Aus gasförmigen Ausgangsverbindungen (Monomeren) können somit Schichten sehr genau Atomlage für Atomlage abgeschieden werden. Niederdruckplasmen haben überdies den Vorteil, dass auf Grund des niedrigen Drucks, also der sehr geringen Zahl von Atomen und Molekülen im Plasma, vergleichsweise viel Zeit vergeht, bis eines der Teilchen mit einem anderen kollidiert.

Mut zur Lücke

Radikale und andere Partikel sind also sehr langlebig. Sie lassen sich deshalb besser zum Design homogener, funktionaler Beschichtungen bei niedrigen Temperaturen nutzen. Dies spielt gerade bei komplexen, dreidimensionalen Oberflächen, wie Textilien sie aufweisen, eine große ▷



Das Rasterkraftmikroskop enthüllt: Die Faser wurde mit einem Polymer beschichtet, das Nanoporen aufweist.

▷ Rolle, um auch eine Beschichtung der innen liegenden Fasern zu erhalten.

Wir haben ein Verfahren entwickelt, um nanoporöse Beschichtungen auf textilen Werkstoffen herzustellen. Dazu verwenden wir Kohlenwasserstoff-Monomere und mischen sie mit ätzenden, sauerstoff- oder stickstoffhaltigen Gasen. Auf den Fasern vernetzen die Kohlenwasserstoffe zu einer stabilen Matrix. Weil gleichzeitig zur Schichtabscheidung auch Ätzprozesse stattfinden, bilden sich aber Lücken. Dort werden sauerstoff- oder stickstoffhaltige funktionelle Gruppen gebunden. Dank dieser Nanoporen vergrößert sich die gesamte Oberfläche enorm: Während normale Textilien auf Grund ihrer Fasern lediglich eine Oberfläche von etwa 0,1 Quadratmeter pro Gramm aufweisen, Mikrofasern immerhin das Zehnfache, erreichen wir mit den neuen Schichten das Tausendfache.

Fasern versilbern

Um die erzeugten Strukturen überhaupt nachzuweisen, verwenden wir wenige Nanometer große Farbstoffmoleküle, die sich an die funktionellen Gruppen binden. Auf diese Weise lässt sich zeigen, dass die Nanoporen miteinander verbunden sind und im gesamten Schichtvolumen funktionelle Gruppen tragen – die Farbintensität steigt linear mit der Schichtdicke. Und schon sind wir mitten in der Anwendung: Polyester- oder Polypropylen-Gewebe lassen sich ohne solche Plasmaschichten nicht mit dieser Klasse von Farbstoffen einfärben. Und noch ein Vorteil: Die Farbstoffe werden chemisch gebunden, sind abriebfest und bleiben beim Waschen erhalten.

Damit öffnen sich weitere Anwendungsfelder. Mit Fluorkohlenstoffen ergäbe sich eine waschbeständige, schmutzabweisende Beschichtung. Bringt man polare chemische Gruppen in die Poren ein, wird die gesamte Oberfläche gut benetzbar und transportiert Feuchtigkeit von der Haut nach außen.

Eine Variante der Plasmatechnologie metallisiert textile Fasern, etwa um die elektrostatische Aufladung zu reduzieren. Bei diesem Verfahren werden die Schichten nicht aus der Gasphase, sondern durch »Sputtern« erzeugt: Hochenergetische Plasmateilchen schlagen Cluster von Metallatomen aus einem so genannten Target; diese scheiden sich auf den Textilien ab und wachsen zu einer nanometerdicken Metallschicht auf. Wird Silber als Metall verwendet, entsteht zudem ein antibakterieller Effekt: Silberionen, zum Beispiel durch Schweiß aus der Metallschicht gelöst, stören den Stoffwechsel von Bakterien. Weil man dabei im Nanobereich arbeitet, ist die Belastung des menschlichen Körpers durch das Schwermetall vernachlässigbar.

Man kann noch einen Schritt weitergehen und die Abscheidung von Plasmaschichten aus der Gasphase mit dem Sputtern verbinden. Dabei werden Silber-Nanopartikel, die von einem Silbertarget abgetragen werden, in einem Prozessschritt in die Plasmaschicht eingebunden, die aus einer hoch vernetzten Kolenwasserstoffmatrix besteht. Die große Oberfläche der Nanopartikel, die homogen verteilt an der Oberfläche vorliegen, sorgt trotz des geringen Metalleinsatzes für einen recht guten antibakteriellen Effekt. Die Plasmaschicht kann zudem weitere funktionelle Gruppen in ihren Poren tragen, wodurch sie »multifunktional« wird.

Und was kostet das?

So lautet die zweite Frage der Textilindustrie. Die Veredlung mit dem Niederdruckplasma erfordert geeignete Reaktoren. Neben Laborsystemen zur Prozessoptimierung entwickelten wir deshalb eine Demonstrationsanlage für Fasern und eine für textile Flächen, beide für eine industrielle Umsetzung. Beim Metallisieren von Fasern erwies sich das neue Verfahren als wirtschaftlicher gegenüber der Nasschemie, die nur dickere Schichten zu Wege bringt. Vor allem aber bleiben die Eigenschaften der Textilien dank der geringen Abmessungen der Beschichtung erhalten. Ein weiterer Vorteil: Es entsteht kein Abwasser.

In der Fertigung von Verpackungsfolien und Glasscheiben hat sich die Plasmatechnologie längst durchgesetzt. Die Textilindustrie schrecken noch die hohen Investitionskosten, doch dürfte mittelfristig kein Weg an dieser Technik vorbeiführen. Ansonsten würde Europa weitere Marktanteile an günstiger produzierende Länder verlieren. ◁

AUTOR UND LITERATUR



Dirk Hegemann leitet die Gruppe »Plasmamodifizierte Oberflächen« am Schweizer Materialwissenschaftlichen Institut Empa in St.Gallen.

Hydrophilierung von Geweben mittels Plasmatechnologie. Von Dirk Hegemann, Armin Fischer und Dawn Balazs in: Textilveredlung, Heft 3/4, S. 14, 2005

Plasmafunktionalisierung von Textilien und Fasern. Von Dirk Hegemann und Armin Fischer in: Vakuum in Forschung und Praxis, Heft 16, S. 240, 2004

Nanowasser – ein guter Tropfen

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Wie verhält sich Wasser, wenn es zu Nanotröpfchen aus wenigen Molekülen schrumpft?

Von Martin K. Beyer

Man sollte meinen, das Oxid des Wasserstoffs habe nicht mehr allzu viele Überraschungen zu bieten. Etwa 71 Prozent der Erdoberfläche sind mit H_2O bedeckt, Pflanzen enthalten bis zu 95 Prozent davon, höhere Tiere wie der Mensch bis zu 75 Prozent. Bei null Grad Celsius gefriert Wasser, bei einem Umgebungsdruck von einer Atmosphäre und hundert Grad Celsius beginnt es zu sieden. Weil die Elektronendichte des Moleküls nicht gleichmäßig verteilt ist, hat H_2O ein Dipolmoment. Das wiederum sorgt dafür, dass Salze in wässriger Lösung in positiv und negativ geladene Ionen zerfallen. Das alles ist gut erforscht und seit Langem bekannt.

Doch was geschieht, wenn ein Tropfen Wasser nur noch einen Nanometer misst, wenn er statt aus Millionen Molekülen nur aus einigen wenigen besteht? Tatsächlich erweisen sich physikalische Kennwerte wie der Gefrierpunkt nun als ungeeignet, denn sie beschreiben das Verhalten im Makrokosmos. Dass es auf der Nanoskala interessant wird, zeigt die Chemie des Lebens: Wenn Enzyme in den Zellen ihre Arbeit verrichten, benötigen manche von ihnen offenbar in ihrem aktiven Zentrum einige wenige Wassermoleküle; deren Aufgabe ist allerdings noch unklar. Werden dabei besondere Eigenschaften von »Nanowasser« genutzt? Falls ja, stellt sich sogleich die Frage: Wären technische Anwendungen denkbar?

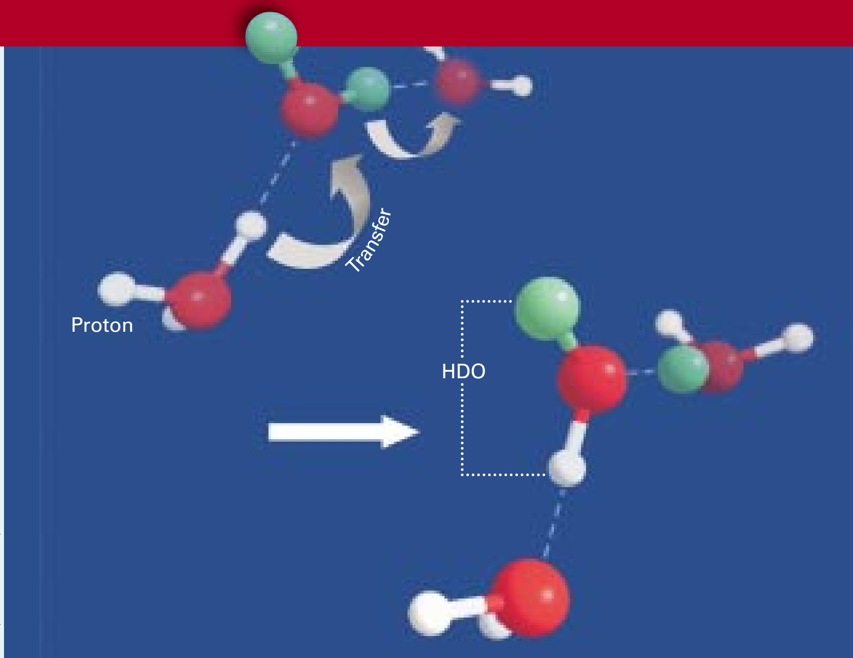
Bei fünfzig Molekülen haben Wassertröpfchen Durchmesser von etwa einem Nanometer. Wir haben eine experimentelle Anordnung entwickelt, mit der wir solche Tröpfchen und sogar noch kleinere erzeugen können. Dazu pusten wir für fünfzig Mikrosekunden Helium und Wasser in ein Hochvakuum; das Gemisch expandiert rasch und kühlt sich dabei stark ab. Tröpfchen kondensieren, so genannte Wassercluster aus bis zu hundert H_2O-Molekülen. Exakt darauf abgestimmt wird mit einem Laserpuls hochreines Metall verdampft. Dabei entstehen Ionen und Elektronen, die sich in den Clustern lösen. Nunmehr elektrisch geladen, lassen sich die Tröpfchen mittels elektrischer Felder in ein Ultrahochvakuum überführen und dort in einer Penningfalle, einer Kombination aus elektrischen und magnetischen Feldern, für einige Sekunden einsperren. Der Restgasdruck dort ist mit 10^{-10} Millibar so niedrig, dass von den etwa eine Million gespeicherten Tröpfchen während des Experiments nur rund zehntausend von einem anderen Molekül oder Atom getroffen werden.

Seltene Ionen

Um die Tröpfchen zu beobachten, verwenden wir eine spezielle Form der Massenspektrometrie. Sie nutzt aus, dass geladene Teilchen in einem Magnetfeld mit massenabhängiger Winkelgeschwindigkeit kreisen. Werden die Ionen auf eine Kreisbahn mit einem Durchmesser von einigen Zentimetern beschleunigt, induzieren sie in Empfängern ein Hochfrequenzsignal, aus dem die Masse mathematisch durch Fourieranalyse zu ermitteln ist. Sollen die Nanotröpfchen weiter schrumpfen, müssen wir nur abwarten. Denn der gesamte Prozess kühlt das Molekülensemble auf 150 bis 200 Kelvin ab, die Umgebung hat aber Zimmertemperatur, also 300 Kelvin. Die Tröpfchen erwärmen sich, bis sich ein einzelnes H_2O-Molekül herauslöst, wodurch sie noch weiter abkühlen. Dieses Wechselspiel kann so weit gehen, dass nur noch drei oder vier Moleküle übrig sind. Dann steckt bei Zimmertemperatur nicht mehr genug Wärme im Cluster, um Wasserstoffbrückenbindungen aufzubrechen.

Dass sich der Aufwand lohnt, zeigen beispielsweise Experimente mit Vanadium (V). Die meisten Chemiker kennen zwei- und dreifach positiv geladenes Vanadium, nicht aber das einfach positive V^+. Denn in einer makroskopischen Lösung »disproportionieren« zwei solche Ionen zu V und V^{++}. In Nanotröpfchen ist aber nur ein Ion gelöst und das V^+ bleibt zunächst stabil. Und doch entstehen die mehrfach geladenen Varianten, denn die Wassermoleküle fungieren auf dieser Größenskala nicht nur als Lösungsmittel, sondern auch als Partner für Redoxreaktionen. Dabei werden Elektronen ausgetauscht. Der abgebende Partner, in diesem Fall das Vanadium, wird oxidiert, der aufnehmende, hier der Wasserstoff, reduziert. Bei neun bis elf H_2O-Molekülen entstehen bevorzugt zweifach geladene Metallionen sowie atomarer Wasserstoff H. Ab zwölf Clustermolekülen dominiert das dreifach geladene Vanadium und molekularer Wasserstoff H_2. Die bei der Reaktion jeweils freiwerdende Energie sorgt dafür, dass weitere Wassermoleküle verdampfen.

Dieser eigentümliche Effekt ist keineswegs nur von akademischem Interesse. Würde man ihn verstehen, wären neuar-



MARTIN BEYER, MIT FRDL. GEN. VON WILEY-VCH 2006; AUS: ANGEWANDTE CHEMIE, BD. 118, NR. 24, Z. SUN, M. BEYER ET AL., PROTONENTRANSFER IN IONISCHEN WASSERCLUSTERN

Ein Transfer von Protonen H^+ mit einer Umlagerung von O-H-Bindungen ist ein Merkmal von flüssigem Wasser im Makroskopischen. Doch findet dieser Prozess auch in Nanotröpfchen statt? Zum Nachweis gab der Autor D_2O hinzu, also schweres Wasser, in dem das Isotop Deuterium (grün) den leichteren Wasserstoff (weiß) ersetzt. Ein Massenspektrum belegte, dass durchaus HDO entstand, also ein Austausch von Deuterium gegen ein Proton erfolgte. Die Grafik zeigt die dazu nötigen Umlagerungen in einem Cluster $H(H_2O)_n^+$, in dem die beteiligten Wassermoleküle eingebettet sind. Sauerstoff ist rot dargestellt.

tige Nanomaterialien denkbar. In ihren Poren sollten sie genau diejenige Anzahl Wassermoleküle ansammeln, die eine erwünschte Reaktion bevorzugt ablaufen lässt. Eine mögliche Anwendung wären die Elektroden in Brennstoffzellen, an denen die Umkehrreaktion abläuft: Elementarer Wasserstoff wird oxidiert und gibt sein Elektron an die Elektrode ab. An der zweiten Elektrode nimmt Sauerstoff das Elektron auf und wird reduziert, am Ende bildet sich Wasser.

Ein sehr interessantes Phänomen in makroskopischem Wasser ist die so genannte Autoprotolyse – selbst hochreines Wasser dissoziiert in geringem Maß in Protonen H^+ und Hydroxidionen OH^-. Das bewirkt einen beständigen Austausch von Protonen zwischen benachbarten Wassermolekülen. Gibt es dergleichen auch in Nanotröpfchen? Um dies zu klären, brachten wir D_2O-Moleküle in die Penningfalle, also Verbindungen aus dem schweren Wasserstoffisotop Deuterium und Sauerstoff. Wie erwartet, wurden die Nanotröpfchen entsprechend schwerer. Werden bei der Verdampfungskühlung nur H_2O oder D_2O frei, verringert sich die Tröpfchenmasse jeweils um 18 oder 20 atomare Masseneinheiten. Würde ein Protonenaustausch stattfinden, müssten sich dabei HDO-Moleküle bilden und die Tröpfchen würden um 19 Einheiten leichter.

Das Experiment bestätigte, dass Protonentransfer tatsächlich stattfindet, wenn wir ein einziges H^+ als Ladungsträger einbauen. Überraschend war, dass kein Protonentransfer stattfand, wenn der Ladungsträger stattdessen ein einzelnes Elektron ist. Während ein Elektron in makroskopischem Wasser nach 400 Mikrosekunden von einem Proton aufgenommen wird, blieb das geladene Teilchen im Nanotröpfchen erstaunlich stabil. Das eröffnet ebenfalls Anwendungsmöglichkeiten: Reagiert das Elektron mit einem Kohlenwasserstoff, kann sich ein negativ geladenes, chemisch sehr reaktionsfreudiges Ion bilden.

Tröpfchen als Testlabor

Entreißt es einem Wassermolekül ein Proton, resultiert ein elektrisch neutrales Kohlenwasserstoffradikal. Dieses Schema kennen Biochemiker gut, denn Enzyme katalysieren häufig auf diese Weise eine Hydrierung, also das Anlagern von Wasserstoff an einen Kohlenwasserstoff. Nanotröpfchen eignen sich demnach als In-vitro-Systeme, um Lebensprozesse in einer idealisierten Umgebung besser zu verstehen.

Unsere bisherigen Experimente offenbaren also Erstaunliches über das Nanowasser: Der Verlauf einer Redoxreaktion hängt von der Größe des Tröpfchens ab; gelöste Elektronen sind darin stabil; für den Protonentransfer genügt ein überzähliges Proton; Disproportionierung einfach geladener Metallionen ist nicht möglich, wenn nur ein einzelnes Ion gelöst ist (was den Chemikern neue Möglichkeiten bietet, mit einfach geladenen Übergangsmetallen zu arbeiten). Ob sich letztlich auch eine technische Anwendung finden wird, können wir zu diesem Zeitpunkt noch nicht sagen. Denn die mit unserem Verfahren herstellbaren Mengen wären bislang einfach zu gering, andere Methoden müssten gefunden werden. Doch Vorsicht: Die Temperatur- und Druckverhältnisse in der Nanowelt unseres Massenspektrometers lassen sich nicht einfach auf die makroskopische Sphäre übertragen. Dort werden chemische Reaktionen durch Wärme aktiviert, wegen der Verdampfungskühlung haben unsere Nanotröpfchen aber einen sehr geringen Wärmeinhalt.

Ein Anwendungspotenzial wäre durchaus vorhanden. So wird die so genannte Birch-Reduktion bei der Herstellung von Steroiden eingesetzt, ein wesentlicher Schritt in dieser Reaktionskette ist der Transfer eines einzelnen Elektrons zu einem aromatischen Kohlenwasserstoff. Normalerweise wird dies in flüssigem Ammoniak realisiert – eine elektrochemische Route über Elektronen, die in Nanotröpfchen stabilisiert sind, könnte diesen wirtschaftlich bedeutsamen Prozess revolutionieren. Auch zur Lösung grundlegender Fragen zur geplanten Wasserstoffwirtschaft könnten Nanotröpfchen dienen – weil sie uns helfen, die Chemie des Wasserstoffs in Wasser besser zu verstehen. ◁

AUTOR UND LITERATUR



Martin K. Beyer hat sich in Physikalischer Chemie habilitiert. Er erforscht an der Technischen Universität Berlin die Gasphasenionenchemie von Clustern. Seine Arbeiten an Nanotröpfchen wurden 2003 mit dem Heinz-Maier-Leibnitz-Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft und des Bundesministeriums für Bildung und Forschung ausgezeichnet.

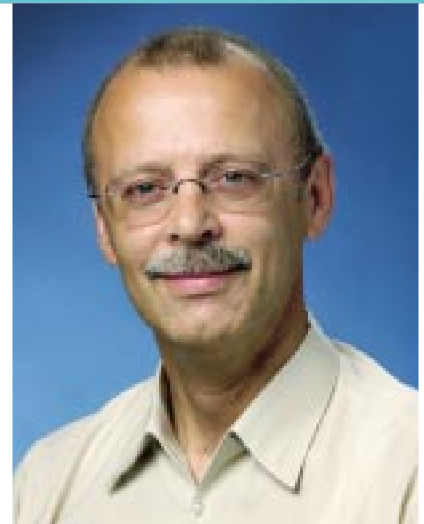
Protonentransfer in ionischen Wasserclustern. Von Zheng Sun et al. in: Angewandte Chemie, Bd. 118, S. 4133, 2006

How many molecules make a solution? Von Vladimir E. Bondybey und Martin K. Beyer in: International Reviews in Physical Chemistry, Bd. 21, S. 277, 2002

INTERVIEW Klein und giftig?

»Trotz vieler aussichtsreicher Ansätze noch kein Durchbruch«

Winzige Teilchen sind Hoffnungsträger für die Industrie, denn im Nanometermaßstab zeigen Werkstoffe neue Eigenschaften. So dienen Titandioxid-Partikel (TiO_2) von mehr als fünf Mikrometer Durchmesser schon seit Jahrzehnten als weißes Farbpigment, neuerdings aber werden sie auch Sonnencremes zugesetzt – bei nur 50 bis 100 Nanometer Durchmesser absorbieren sie ultraviolettes Licht. Doch wo Licht ist, ist auch Schatten. Der Biologe und Chemiker **Harald F. Krug** vom Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) untersucht die Gefahren, die von einer massenhaften Verwendung der Nanopartikel ausgehen.



Harald F. Krug leitet die Abteilung »Molekulare und Umwelttoxikologie« am Institut für Toxikologie und Genetik des FZK.

Zurzeit wird rege über Feinstäube diskutiert. Inwiefern berührt das Ihr Forschungsfeld der Nanopartikel?
Auch Nanotoxikologen untersuchen Wirkungen und Wirkmechanismen winziger Teilchen, doch während Feinstäube als Abfallprodukte bei Verbrennungsprozessen entstehen, werden Nanopartikel gezielt synthetisch hergestellt. Und zwar nicht nur aus Kohlenstoff, sondern auch aus Metallen oder Metalloxiden. Als noch junge Wissenschaft profitieren wir aber natürlich von dreißig Jahren Feinstaubforschung.

Welche Gemeinsamkeiten gibt es da?
Partikel mit Durchmessern unter 200 Nanometer trotzen der Schwerkraft. Sie sinken nicht zu Boden, sondern diffundieren wie Moleküle durch ein Medium und schweben.

Atmen wir sie ein, gelangen sie bis in die Lungenbläschen und setzen dort entzündliche Prozesse in Gang, die bei hoher oder dauerhafter Belastung chronisch werden können. Auch Krebs ist eine mögliche Folge.

Wie können so kleine Objekte so schädlich sein?
Die Oberfläche von Nanopartikeln ist chemisch sehr reaktiv. Wenn Sie mit einem geeigneten Mikroskop den Umfang eines, sagen wir fünf Mikrometer durchmessenden, Pigmentpartikels abtasten, können Sie rund eine Milliarde Titandioxid-Moleküle erkennen. Beim hundertmal kleineren TiO_2-Sonnencreme-Teilchen von fünfzig Nanometer sind es aber nur etwa hunderttausend. Da wirken sich Defekte im Kristallgitter viel stärker aus. Ein Fremdatom oder eine Fehlstelle ändert die Elektronenverteilung viel drastischer, und dies erhöht die chemische Reaktivität.

Zudem ist bei gleicher Masse die Zahl der Teilchen viel höher als im Mikromaßstab und damit die Gesamtoberfläche um ein Vielfaches größer.

Was geschieht nun, wenn wir solche Partikel einatmen?
Durch Elektronenübergang auf Sauerstoff entstehen an der Teilchenoberfläche Radikale, die ihrerseits das Gewebe angreifen. Daraufhin läuft eine Entzündungsreaktion an. Makrophagen nehmen die Fremdkörper auf und senden chemische Signale aus, die andere Zellen des Immunsystems herbeirufen. Auch die Epithelzellen des Gewebes reagieren und produzieren Botenstoffe.

Eine zweite Antwort auf die Eindringlinge ist die Produktion von Enzymen dieser Zellen, um die Sauerstoffradikale für sie selbst unschädlich zu machen. In einer dritten Antwort setzen die Makrophagen und die herbeigerufenen Granulozyten Stoffe wie die Prostaglandine frei und veranlassen damit zum Beispiel die Bronchien, sich zum Schutz zusammenzuziehen.

Und das geschieht immer, sobald Nanopartikel in die Lunge gelangen?
Das geschieht sogar andauernd, denn diese Mechanismen existieren ja, weil wir permanent aus unserer Umwelt auch natürlichen Nanopartikeln ausgesetzt sind. Nachdem wir etwa zwanzig verschiedene Materialien getestet haben, Metalle, Metalloxide, Fullerene und Kohlenstoff-Nanoröhrchen, können wir klar sagen: Bis auf Ausnahmen benötigt man unrealistisch hohe Partikelkonzentrationen, damit das aus dem Ruder läuft und toxisch wird. Die Dosis macht das Gift.

Als mein amerikanischer Kollege David Warheit vom DuPont-Haskell-Labor vor zwei Jahren über die tödlichen Folgen von Carbonanotubes in Rattenexperimenten berichtete, war die Aufregung groß. Doch wenn Sie die Mengen, die er den Tieren direkt in die Lungen gab, auf einen Menschen umrechnen, dann müsste der mehrere Teelöffel davon auf einmal einatmen. Oder sich acht Stunden lang in einer Umgebung aufhalten, die den Grenzwert für Feinstaubimmissionen um das 14 000-Fache übersteigt. Wenn ich einen Liter Wasser inhalierte, wäre das auch tödlich.

Sie sprachen von Ausnahmen?
Die nicht weiter überraschen. Zum Beispiel wird Vanadiumtrioxid auf Grund seiner Reaktionsfreudigkeit in Nanogröße schnell in Pentoxid oxidiert und das ist nun einmal bekanntermaßen giftig.

Sie haben ein Zellmodell entwickelt, das den Verhältnissen der Lunge näher kommen soll als andere In-vitro-Tests. Inwiefern?
Meist züchtet man eine einzige Schicht Epithel- oder Fresszellen auf einem Nährmedium und tropft Nanopartikel in einer Lösung auf. In Wirklichkeit haben die Lungenbläschen aber einen mehrschichtigen Aufbau aus verschiedenen Zelllagen, die miteinander durch chemische Signale kommunizieren. So eine Interaktion fehlt in Monolayern aus nur einem Zelltyp.

Ein ganz falsches Bild vermittelt auch das Lösungsmittel. Bis Nanopartikel dort hindurch zum Zielort diffundiert sind, vergeht zu viel Zeit. Auf den Lungenbläschen befindet sich zwar wirklich eine Flüssigkeitsschicht. Ihre Aufgabe ist es, durch ihre Oberflächenspannung zu verhindern, dass die Lunge kollabiert. Aber sie ist nur zehn bis fünfzig Nanometer dick, da sind die Teilchen schnell durch.

Und wie bringen Sie Partikel zu den Zellen?
Durch ein Aerosol, also eine Art Suspension der Teilchen in Luft. Wir sind weltweit die Einzigen, die diesen hohen apparativen Aufwand treiben. Nach solchen In-vitro-Tests gehen unsere Kooperationspartner im Projekt NanoCare gezielt Fragen in Tierversuchen nach.

Gibt es außer der Erzeugung von Sauerstoffradikalen noch andere Mechanismen der Schädigung?
Da wird viel spekuliert. Es gibt Hinweise, dass Nanopartikel von Mitochondrien aufgenommen werden, den Energiefabriken der Zellen. Dort könnten sie die Atmungskette unterbrechen, die ATP produziert, den Treibstoff der Zelle. Das hätte deren Tod zur Folge, außerdem entstünden wieder Sauerstoffradikale.

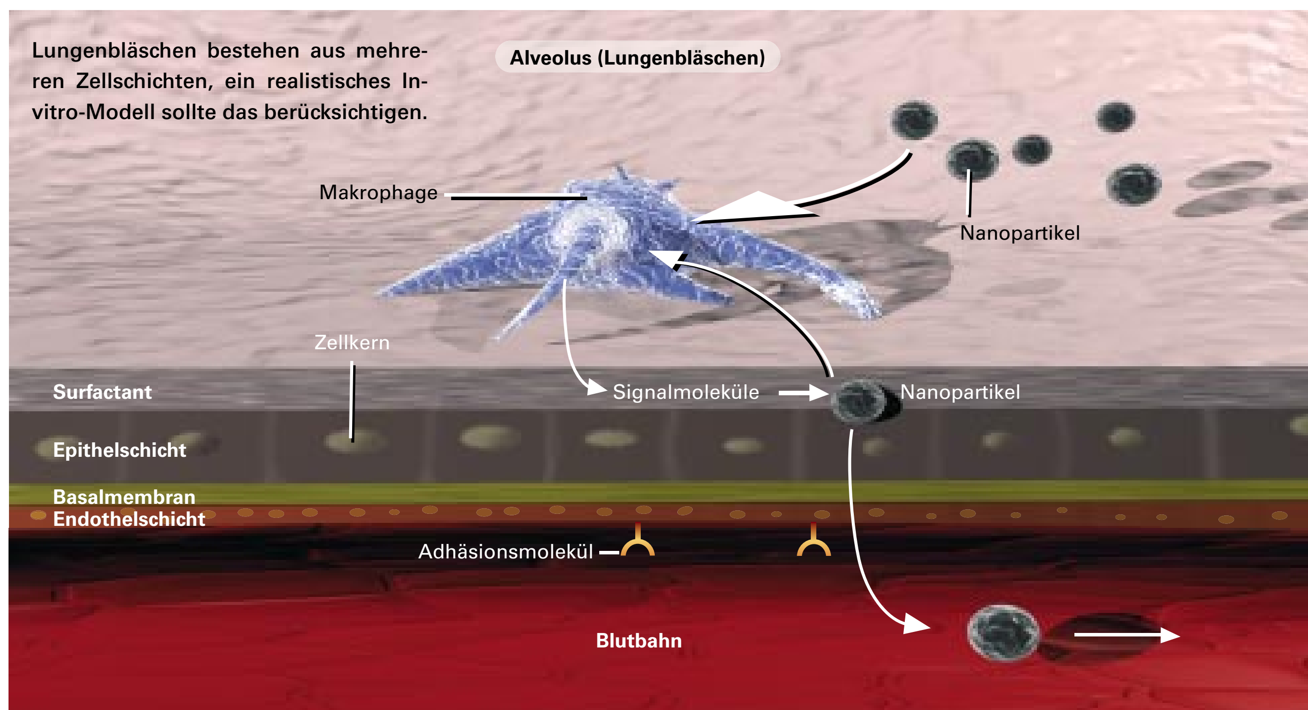
Könnte davon auch der Zellkern direkt betroffen sein?
Einige Toxikologen berichten, dass Partikel dort eingedrungen seien. Theoretisch ist das gut möglich, denn die Poren der Zellkernmembran sind immerhin 35 bis 39 Nanometer groß. Im Zytoplasma verteilen sich die Partikel sehr gleichmäßig, also könnten sie durch Diffusion in den Kern gelangen. Doch wir stellen immer wieder fest: Dies geschieht nicht. Ich vermute, es gibt einen noch unbekannten Schutzmechanismus des Zellkerns und anders lautende Berichte beruhen auf methodischen Fehlern. Das ist derzeit ein spannendes Thema.

Sie nannten die Lunge als möglichen Ort einer Schädigung. Könnten die Teilchen nicht auch über andere Organe wie die Haut oder den Verdauungstrakt in unseren Körper eindringen?
Alle Experimente des seit drei Jahren laufenden Verbundprojekts Nanoderm zeigen, dass die Haut eine sehr effiziente Barriere ist. Wer einen Sonnenschutz mit Titandioxid-Teilchen aufträgt, muss sich wohl keine Sorgen machen.

In diese Richtung deuten auch die mir bekannten Studien zum Magen-Darm-Trakt. Sicher, wenn ein Nanopartikel in der Lunge von einem Makrophagen aufgenommen wird, befördert ihn der Schleim in den Magen. Aber unser Verdauungssystem besteht aus hochspezialisierten Zellen, die sehr genau unterscheiden, welche Stoffe ins Blut dürfen. Es gibt Ausnahmen wie Teilchen aus Thallium, Arsen oder organische Verbindungen von Quecksilber, Blei und Zinn, die aus chemischen Gründen darmgängig sind. Wenn Sie sich einmal anschauen, welche Klimmzüge Pharmakologen anstellen, um Nanopartikel aus fettlöslichen Molekülen zu bauen, die Wirkstoffe durch Haut oder Darmwand befördern, dann bin ich ganz beruhigt, was diese Gewebe angeht.

Alles in allem geht von Nanopartikeln also keine Gefahr aus?





Lungenbläschen bestehen aus mehreren Zellschichten, ein realistisches In-vitro-Modell sollte das berücksichtigen.

INTERVIEW

▷ Von Ausnahmen abgesehen und mit Blick auf den Endverbraucher zunächst nicht. Eine toxische Dosis kann bei der Produktion und Weiterverarbeitung der Teilchen erreicht werden. Die entsprechenden Maschinen müssen deshalb luftdicht geschlossen sein und in Reinsträumen stehen. Aber das ist bei deutschen Herstellern meiner Kenntnis nach schon jetzt der Fall. Die große Frage lautet nun: Was geschieht mit Nanopartikeln, wenn die Produkte, in denen sie verwendet wurden, altern, verwittern oder entsorgt werden?

Können Sie ein Beispiel nennen?
Über kurz oder lang werden Kohlenstoffnanoröhrchen die Karbonfasern in Verbundwerkstoffen ersetzen, denn sie sind strapazierbar, leicht und auch sehr hitzestabil. Wenn also das Handygehäuse oder der Tennisschläger in die Müllverbrennungsanlage kommt, werden dann Nanoröhrchen freigesetzt und gelangen in die Abluft? Oder hat die Einbindung in den Kunststoff ihre Oberfläche so modifiziert, dass sie verbrennen?

Ließe sich eine Freisetzung in die Umwelt überhaupt messen?
Das wird bei manchen mitunter sicher schwer, denn viele Stoffe kommen in der Natur auch vor. Nehmen Sie die Eisenoxid-Nanopartikel. Das sind hervorragende Katalysatoren für den Abbau von Kohlenwasserstoffen und deshalb Hoffnungsträger für die Abwasseraufbereitung. Wenn sie aus der Kläranlage in die Flüsse geraten sollten, wird sich das kaum nachweisen lassen, denn Eisen ist das vierthäufigste Element der Erdkruste.

Ähnliches gilt für Siliziumdioxid, das häufigste Mineral auf der Erdoberfläche. In diesem Fall würde ich vermuten, dass sich die Partikel mit ihresgleichen oder anderen Stoffen verbinden und damit völlig harmlos werden. Aber das muss untersucht werden, und zwar für alle neuen Werkstoffe. ◁

Die Fragen stellte **Klaus-Dieter Linsmeier**.

▶ **HINWEIS:** AUF DEN NÄCHSTEN 24 SEITEN FOLGT EIN SONDERTEIL DER DFG!

Der Piezo-Hundertfüssler

Karlsruher Physiker entwickeln einen neuartigen Antrieb für Fertigungsstraßen, der Gegensätze vereint.

Hochgenaue Nanopositionierung ist in der Industrie und im Labor gefragt. So besitzen die Schaltkreise moderner PC-Prozessoren derzeit 93 Nanometer breite Strukturen, hergestellt durch die Projektion von Schaltungslayouts, den so genannten Masken, als Schattenwurf auf die Siliziumoberfläche künftiger Chips. Masken und optische Linsen müssen aber genauer als ein Nanometer zueinander ausgerichtet werden. Auch Rasterkraftmikroskope erfordern eine derart präzise Ansteuerung.

Klassische Antriebe wie Elektromotor mit Getriebe und Gewindestange sind dafür nicht mehr geeignet. Reibung und mechanische Toleranzen erlauben bestenfalls eine Genauigkeit von 0,1 Mikrometern. Eine Alternative bietet der piezoelektrische Effekt spezieller Keramiken. In diesen Werkstoffen sind positive und negative Ladungen auf atomarer Ebene leicht gegeneinander verschoben, sie sind elektrisch polarisiert. Bei Anlegen einer elektrischen Spannung ändert eine Piezokeramik deshalb die Form, sie dehnt sich beispielsweise aus – je höher die Spannung, desto größer die Auswirkung.

In der Praxis begrenzen allein statistische Schwankungen der elektrischen Spannung die Genauigkeit eines Piezoantriebs auf 0,01 Nanometer, das entspricht einem Zehntel des Durchmessers eines Wasserstoffatoms. Weitere Vorteile: Piezokeramiken reagieren innerhalb von Mikrosekunden auf das Steuersignal und erzeugen hohe Kräfte, die selbst tonnenschwere Lasten bewegen können. Müssen die Antriebe eine bestimmte Position halten, bleibt die Spannung konstant und es fließen keine elektrischen Ströme. Der Energieverbrauch ist dadurch sehr gering und es wird keine Abwärme erzeugt, also auch keine Kühlung benötigt. Darüber hinaus sind die Piezokeramiken vakuum- und reinraumtauglich und können auch bei extrem tiefen Temperaturen nahe null Kelvin sowie in starken Magnetfeldern betrieben werden.

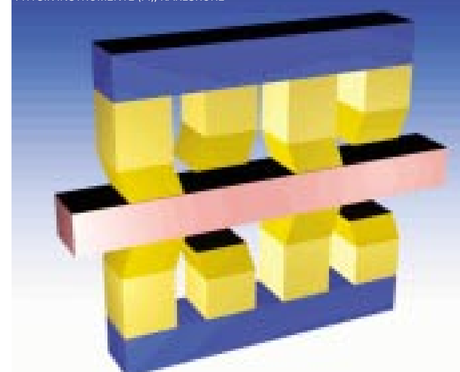
Allerdings sind die möglichen Stellwege gering, nicht mehr als etwa ein Tausendstel der Keramiklänge. So würde für eine Verschiebung eines Objekts um einen Millimeter bereits eine ein Meter lange Keramik benötigt. In der Praxis wird diese winzige Bewegung daher über Hebel verstärkt. Das geht jedoch zu Lasten der Steifigkeit des Systems. Es kann bei schnellen Richtungswechseln in Schwingung geraten. Das wiederum verschlechtert die Reaktionsfähigkeit und die Genauigkeit, die aber immer noch im Bereich unter einem Nanometer liegt. Mit sehr präzisen Hebeln in Form von dünnen Metallbrücken lassen sich Stellwege bis zu einem Millimeter realisieren. Die Systeme werden etwa in Rasterkraftmikroskopen eingesetzt.

Für die Halbleiterfertigung reicht das freilich noch nicht. Für diesen Bereich haben wir einen Piezo-Linearantrieb entwickelt, der eine Stange, den Läufer, vor- und zurückschiebt. Der Trick ist: Indem wir die Steuerspannung im unteren Bereich der »Piezobeine« quer zur Polarisationsrichtung anlegen, werden diese Stellglieder seitlich ausgelenkt. Die oberen Beinchen hingegen werden abwechselnd angehoben und abgesetzt. Insgesamt ergeben diese Schrittfolge und die Scherbewegung Stellwege bis zu einigen Zentimetern mit einer Auflösung weit unter einem Nanometer.

Holger Hoffmann

Der Autor ist Marketingmanager beim Karlsruher Unternehmen Physik Instrumente (PI).

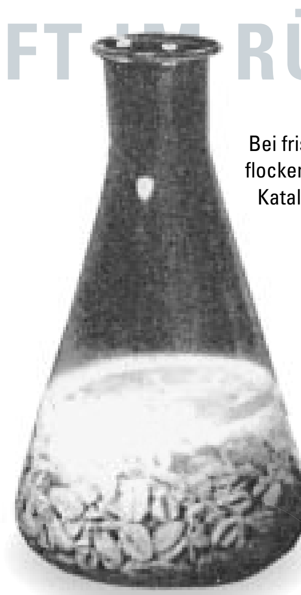
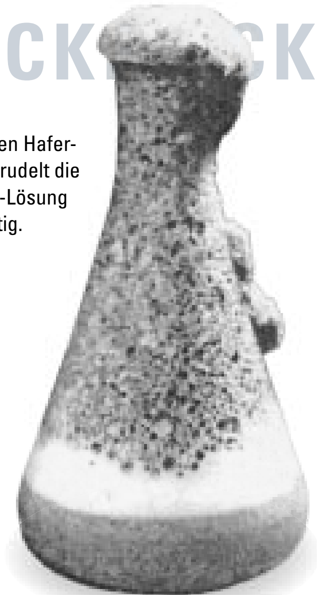
Das neue Antriebsprinzip: Jedes Piezobein schiebt mit der unteren Hälfte der Keramik (dunkelgelb) und hebt oder senkt sich mit der oberen. Damit die losgelösten Beine nach dem Wiederaufsetzen gleich den vollen Schub aufbringen können, sind sie bereits in die entgegengesetzte Richtung ausgelenkt.


PHYSIK INSTRUMENTE (PI), KARLSRUHE



Die Ersatz-Linse

»Verletzungen und Alterserkrankungen der menschlichen Linse können zu einer Linsentrübung führen … Nach der operativen Entfernung der Linse ist das Tragen von ›Starbrillen‹ erforderlich. … Eine Verbesserung trat durch die Einführung der Haftschalen ein, die dem linsenlosen Auge wieder zur Sehkraft verhelfen können. … Schreck setzt eine Kunststofflinse in die vordere Augenkammer vor die Pupille ein, und zwar eine mit dünnen Haltestegen oben und unten. Obwohl diese vor der Regenbogenhaut sitzt, ist sie von außen nicht zu erkennen und verursacht dem Träger keine Beschwerden.« *(Umschau, 56. Jg., Heft 19, S. 589, Oktober 1956)*

Bei frischen Haferflocken sprudelt die Katalase-Lösung heftig.

Textile Wärmeisolation

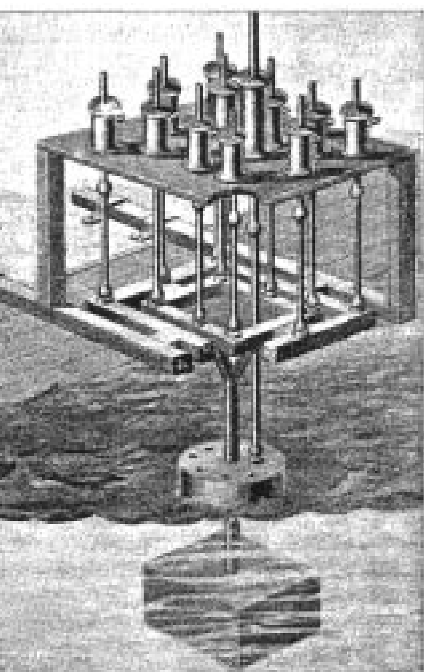
»Perlon wird jetzt mit einer Aluminium-Auflage hergestellt. Versuche zeigten, dass eine Speziallegierung, die auf das Gewebe gestrichen wird, reflektierende Eigenschaften hat. Auf der Innenseite von Kleidungsstücken wird die Wärme gehalten, auf der Aussenseite abgestrahlt. Es ist so möglich, im Winter einen Wärme-, im Sommer einen Kühlungseffekt zu erzielen. Beim Metallisieren von Textilgeweben werden im Hochvakuum Metalle oder andere Substanzen auf das Material aufgedampft. Das … wurde erst möglich, nachdem die Industrie neue Diffusionspumpen entwickelt hatte.« *(Neuheiten und Erfindungen, 23. Jg., Nr. 263, S. 184/185, 1956)*

Frischkosttest

»Getreideflocken und -schrote werden von manchen Herstellern … konserviert. Ein einfacher Versuch gestattet es … zu untersuchen, ob bei der Herstellung eine Hitzebehandlung erfolgt ist oder nicht. Das Verfahren beruht auf dem Nachweis der Katalase, eines thermolabilen Fermentes, das in allen lebenden Zellen vorkommt. Man übergießt in einem Glasgefäß 15 g Schrot oder Flocken mit 50 g Wasser und setzt dann 30 ccm … Wasserstoffsuperoxyd zu. Ist das Getreide frischwertig, so beginnt sofort eine sehr lebhafte Gasbildung, da die Katalase Sauerstoff freisetzt …« *(Umschau, Heft 19, S. 603, Oktober 1956)*

Kraftwerk wandelt Wellen in Energie um

»Ein neuer Wellenmotor bezweckt, außer den vertikalen auch die horizontalen Wellenbewegungen in nutzbare Energie zu verwandeln. Ein … Gebälk trägt eine Plattform, auf welcher die Zylinder einer größeren Anzahl von Pumpen ruhen. … An dem innersten Rahmen sitzt starr ein langer Hebel, an dessen unterem Ende ein großer Schwimmkörper sich befindet. Letzterer hat das spezifische Gewicht des Wassers und nimmt an allen horizontalen Wellenbewegungen teil. … Die runde Stange, an welcher der große Schwimmkörper sitzt, trägt noch einen zweiten, senkrecht verschiebbaren Schwimmkörper, der jedoch leichter ist als Wasser und an der hebenden Bewegung der Wellen teilnimmt. Dieser Schwimmer ist … direkt mit einer Anzahl von Kolben verbunden.« *(Illustriertes Jahrbuch der Erfindungen, 6. Jg, S. 198, 1906)*



◀ Die zwei Schwimmer lassen die Pumpen tanzen.

Weinalterung mit Ozon



»In neuerer Zeit wird … ein Verfahren bekannt gegeben, … durch welches die Erzeugung des Ozons innerhalb der Flüssigkeiten … hervorgebracht wird. … Nachdem Sauerstoff … in das mit der Flüssigkeit gefüllte Gefäß … geleitet … ist, werden durch Elektroden einer Influenzmaschine Entladungen hervorgerufen. Bei diesem Vorgang verwandelt sich der gelöste Sauerstoff in Ozon (O_3), welches beim Zerfallen in seine Atome mit größter Aktivität einwirkt, während sich zu gleicher Zeit durch die statischen Entladungen molekulare Veränderungen vollziehen; das Zusammenwirken dieser Momente bewirkt den gewünschten Effekt.« *(Zeitschrift für die gesammte Kohlensäure-Industrie, 12. Jg., Nr. 20, S. 630/631, Oktober 1906)*

Linkshändigkeit trainiert

»In Amerika hat unlängst Professor Tadd systematisch versucht, die linke Hand seiner Schüler im Zeichnen auszubilden und damit gute Erfolge erzielt. Aehnliche Versuche sollen nun auch in Königsberg gemacht werden. Die Versuchskurse werden in zwei Knaben- und zwei Mädchenschulen abgehalten werden, sie sollen sich auf Schreiben und Knabenhandarbeit und Zeichnen erstrecken. … Als Teilnehmer sollen nur solche Schüler zugelassen werden, die fleißig, begabt, ordentlich und körperlich kräftig sind. Sie … dürfen, um Ueberbürdung zu vermeiden, nur am Unterricht in einem Fach teilnehmen.« *(Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 242, S. 128, Oktober 1906)*

Blick in ein Supergedächtnis

Das Erinnerungsvermögen des Amerikaners Kim Peek ist unheimlich. Wer menschliche Geistestätigkeit verstehen möchte, muss auch dieses außergewöhnliche Gehirn begreifen.

Von Darold A. Treffert und Daniel D. Christensen

Seine Freunde nennen ihn »Kimputer«. Kim Peek ist heute Mitte fünfzig. Dicke Bücher liest er in ein, zwei Stunden durch, mit kaum zehn Sekunden pro Seite – und stellt sie dann kopfüber ins Regal. Denn nun hat er alles, was darin steht, exakt parat: die Namen der handelnden Personen, die Texte im Wortlaut, selbst die Seitenzahlen der Textpassagen weiß er noch nach Jahren.

Medizinisch gesehen ist Peek ein »Inselbegabter«, ein »Savant« (nach dem französischen Wort für »Gelehrter«). Typisch dafür sind unter anderem herausragende punktuelle Gedächtnisleistungen bei oft mehr oder weniger starken geistigen Defiziten im Allgemeinen. Der Londoner Arzt J. Langdon Down beschrieb das Syndrom 1887. Bei vielen Savants richtet sich die Inselbegabung auf ein bestimmtes Gebiet. Auffallend oft ist das Musik, bildende Kunst oder Mathematik. Down erwähnte damals unter anderem einen Jungen, der das klassische sechsbändige Werk »Geschichte des Verfalls und Untergangs des Römischen Reiches« des britischen Historikers Edward Gibbon (1737–1794) hersagen konnte.

Kim Peek sticht durch sein enormes Fakten- und Detailgedächtnis hervor. Schon mit eineinhalb Jahren behielt er genauestens, was man ihm vorlas. Heute kennt er rund 9000 Bücher komplett auswendig. Aber nicht nur das: Seine phänomenale Begabung richtet sich auf mindestens fünfzehn Interessengebiete, darunter Geschichte, Sport, Filme, Geografie, Raumfahrt, Schauspieler, Bibel, Kirchengeschichte, Literatur, Shakespeare und klassische Musik. Außerdem kennt er alle Postleitzahlen und Vorwahlnummern der USA und weiß, wo welche Fernsehsender empfangen werden können. Er hat die Karten und Stadtpläne von den vorderen Seiten der amerikanischen Telefonbücher im Kopf. Ohne Zögern bezeichnet er in und zwischen allen größeren Städten Fahrtrouten und -richtungen – und das alles schnell wie eine Internetsuchmaschine. Peek erkennt auch hunderte Werke der klassischen Musik beim Hören wieder. Für jedes vermag er anzugeben, von wem, wann und wo es komponiert und uraufgeführt wurde, er nennt viele weitere biografische Details zum Werk und seinem Komponisten und äußert sich zu Aufbau und Art der Stücke. Besonders erstaunlich: Seit ein paar Jahren lernt er jetzt auch Klavierspielen und die Stücke, die er kennt, erklingen zu lassen.

Bemerkenswert ist das vor allem in Anbetracht seiner massiven mentalen Defizite und seiner Hilflosigkeit in der Bewältigung des Alltags. Er geht zum Beispiel schräg seitwärts und kann nicht einmal seine Kleider selbst zuknöpfen. Auch Abstrahieren fällt ihm ausgesprochen schwer. Hirnforscher versuchen nun mit seiner Hilfe herauszufinden, wieso die Leistungen von Savants in einzelnen kognitiven Bereichen so stark auseinanderklaffen. ▷





Der Amerikaner Kim Peek lebt mit einem ungewöhnlich großen, in manchen Strukturen abnormen Gehirn.

ETHAN HILL

▷ Merkwürdig an dem Syndrom ist zum Beispiel, dass diese Menschen vielfach Talente der gleichen Art besitzen. Nicht wenige jener Inselbegabten, die sich durch ein riesiges Gedächtnis auszeichnen, können blitzschnell beliebige Kalenderdaten zuordnen. Peek schüttelt zu jedem Datum sofort den Wochentag aus dem Ärmel, wie kürzlich zum Geburtsdatum eines Interviewers. Keine Sekunde muss er überlegen, dass der 31. März 1956 ein Ostersamstag war. Was geschieht da im Gehirn? Wieso können einige wenige Menschen Dinge, die der Mehrzahl völlig unmöglich sind?

Peeks Gehirn sieht nicht so aus wie das anderer Menschen. So viel zeigen medizinische Aufnahmen (siehe Kasten rechts). Aber wie die Abweichungen mit seinen Sonderbegabungen zusammenhängen könnten, lässt sich hiervon bisher für keine seiner Fähigkeiten direkt herleiten. Einiges beginnen die Forscher allerdings schon zu ahnen. Sie möchten moderne bildgebende Verfahren heranziehen, um zu sehen, wie das Gehirn dieses Mannes arbeitet – welche Bereiche bei bestimmten Tätigkeiten aktiv sind.

Auch hiervon abgesehen lohnt es unseres Erachtens, Peeks besondere Fähigkeiten und seinen Werdegang für die zukünftige Hirnforschung zu dokumentieren. Das Phänomen der Inselbegabung bietet ein einzigartiges Fenster zu unserer Geistestätigkeit, doch Menschen wie ihn findet man ausgesprochen selten. Solange man nicht auch das Savant-Gehirn begreift, wird man sich nicht anmaßen dürfen zu meinen, man hätte die Funktionsweise des menschlichen Gehirns verstanden.

Peek wurde am 11. November 1951 geboren – an einem Sonntag, würde er ergänzen. Das Baby hatte einen viel zu großen Kopf und am Hinterkopf einen baseballgroßen Hirndurchbruch, eine so genannte Enzephalozele. Zwar bildete sich diese »Blase« von selbst zurück, aber Hirnaufnahmen zeigten später weitere Fehlbildungen des Gehirns. Die ersten dieser Hirnbilder machte 1988 einer von uns (Christensen). Seitdem beobachtet er Peeks Entwicklung.

Wenn das halbe Vorderhirn überbordet

Unter anderem ist Peeks Kleinhirn missgestaltet und abnorm klein. Das könnte für seine Bewegungs- und Koordinationsschwierigkeiten verantwortlich sein. Noch markanter ist aber das Fehlen des so genannten Balkens, des *Corpus callosum*, jener prägnanten Struktur aus Nervenfasern, die beide Großhirnhemisphären miteinander verbindet. Was dieser Defekt in Peeks Fall bewirkt, können wir bisher nicht sagen. Denn nicht immer zieht die seltene Fehlbildung Funktionsstörungen nach sich. Manchen Menschen, die von Geburt an keinen Balken haben, merkt man nichts davon an. Wird das *Corpus callosum* jedoch bei einem Erwachsenen durchtrennt – wie es manchmal erfolgte, damit ein Epilepsieherd nicht auf die andere Hirnseite übergriff –, dann tritt das charakteristische »Split-Brain«-Syndrom auf: Die beiden Hemisphären arbeiten nun weit gehend selbstständig, ohne sich zu koordinieren.

Es scheint, als bildeten sich bei einigen ohne Balken geborenen Menschen zum Ausgleich andere Verbindungen, also andere Kommunikationskanäle zwischen den beiden Hirnhälften aus. Und vielleicht kann es dann geschehen, dass beide Hirnhälften nun in gewisser Hinsicht wie eine einzige Riesenhemisphäre arbeiten. Normalerweise eher getrennte Funktionen wären gewissermaßen unter demselben Dach vereint. Sofern das bei Peek zuträfe, könnte er einige seiner Talente tatsächlich der Tatsache verdanken, dass er kein *Corpus callosum* hat. Allerdings ist den Hirnforschern inzwischen der Zweck des Balkens weniger klar, als sie früher annahmen. Noch können sie nicht wirklich erklären, wieso manche Menschen ohne diese Struktur keine offensichtlichen Behinderungen aufweisen, einige aber Savant-Fähigkeiten entwickeln. Manche Neurologen spötteln, sicher sei nur, dass das *Corpus callosum* das Gehirn zusammenhalte und dass es Krampfanfälle weiterleite.

In anderer Hinsicht ist die Theorie weiter gediehen und könnte auf eine Spur führen: Bei Kim Peek fallen Fehlbildungen in der linken Hemisphäre auf, etwas, das bei vielen Menschen mit Savant-Syndrom vorkommt. Das Phänomen ist insofern bemerkenswert, als es sich dann meistens um Männer handelt – so wie auch Legasthenie, Stottern, spätes Sprechenlernen oder Autismus Jungen viel öfter heimsuchen als Mädchen. Die Geschlechtslastigkeit wird mit linksseitigen Hirnfunktionsstörungen in Verbindung gebracht, die vielleicht auf zu viel Testosteron in der vorgeburtlichen Entwicklung zurückgehen. Jungen erzeugen im Mutterleib mehr Testosteron als Mädchen. Im Übermaß aber kann das Hormon junges Hirngewebe schädigen. Da zudem die linke Hemisphäre etwas langsamer reift als die rechte, wäre sie der Gefahr länger ausgesetzt. In dem Zusammenhang erscheint auch das gar nicht so seltene »erworbene Savant-Syndrom« markant. Manchmal nämlich entwickeln ältere Kinder und Erwachsene nach Schädigung der linken Hemisphäre plötzlich neue Talente ähnlicher Art wie bei einer Inselbegabung.

Was mögen diese Beobachtungen besagen? Grundsätzlich sind die beiden folgenden Erklärungen denkbar: Entweder könnte die rechte Hemisphäre normalerweise mit anderen Aufgaben befasstes Hirngewebe benutzen, um die linksseitigen Defekte zu »kompensieren«. Sie würde also Fähigkeiten anstrengen, welche ihr gewöhnlich nicht zu eigen sind. Oder, so spekulieren Forscher, die rechte Hemisphäre ist nun vom Joch der linken Hirnseite befreit, die in der Regel als do-

IN KÜRZE

▶ Eine Inselbegabung – ein **Savant-Syndrom** – geht immer mit einer **phänomenalen Gedächtnisstärke** einher. Bei dem Amerikaner Kim Peek ist die besondere Begabung eine extreme Merkfähigkeit per se.

▶ Sein Gehirn weist mehrere Anomalien auf. So fehlt **der Balken, das *Corpus callosum***, die Verbindung zwischen den beiden Großhirnhemisphären. Entsteht ein Savant-Talent, weil das Gehirn Fehlendes zu kompensieren versucht? Oder kommen normalerweise ruhende, weil durch andere Hirngebiete unterdrückte Fähigkeiten zum Vorschein?

▶ Früher speicherte Peek alles nur im Gedächtnis ab. Später begann er Fakten zu verknüpfen. Seine **gedanklichen Assoziationen** beweisen durchaus einige Kreativität. Seit er Anerkennung findet, wagt er sich auch in die Welt. Sein Beispiel zeigt, dass es sich für die **soziale und intellektuelle Entwicklung** Betroffener lohnt, wenn man ihr Spezialtalent fördert.

minant gilt und in manchem über die rechte Seite bestimmt. Deswegen vermag die rechte Hemisphäre nun einige ihr innewohnende Fähigkeiten hervorzubringen, die sonst schlummern.

Im Jahr 1988 unterzog sich Peek psychologischen Tests. Der ermittelte Gesamtintelligenzquotient war 87. Allerdings lagen die Werte für verschiedene Gebiete weit auseinander. Manche reichten in den oberen Bereich der Skala, dem von hoher Intelligenz. Andere Werte befanden sich im Abschnitt geistiger Behinderung. Die Psychologen kamen folglich zu dem Schluss, die übliche IQ-Wertung würde den geistigen Fähigkeiten des Mannes nicht gerecht. Das berührt den alten Streit, ob ein Mensch eine Gesamtintelligenz besitzt oder eine Vielzahl von Intelligenzen. Mit Kim Peek vor Augen plädieren wir für die Existenz getrennter Intelligenzen.

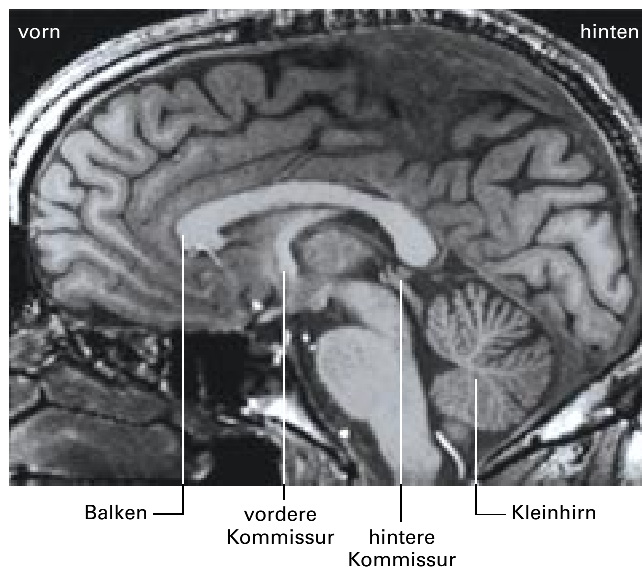
Die Tests ergaben bei ihm eine »ansonsten unspezifische Entwicklungsstörung«. Anzeichen für einen Autismus fanden sich nicht. Ganz anders als Autisten geht Peek unter Menschen und ist recht umgänglich. Das Savant-Syndrom kann, muss aber nicht mit Autismus einhergehen: Zwar treten Inselbegabungen bei Autismus häufiger auf als bei jeder anderen einzelnen geistigen Entwicklungsstörung, doch nur etwa jeder zweite Inselbegabte ist zugleich autistisch. Voraussetzung dafür, dass sich ein Savant-Talent voll ausbildet, scheint aller- ▷

Das Gehirn eines Savants

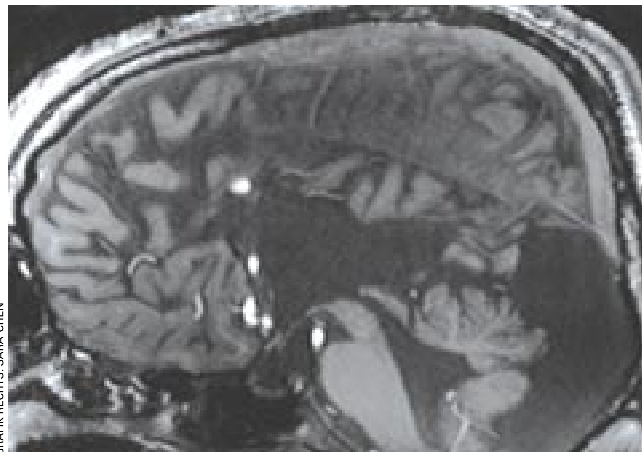
Im riesigen Gehirn von Kim Peek gibt es weder einen Balken, die normalerweise mächtigste Verbindung zwischen den beiden Großhirnhemisphären noch eine vordere oder hintere Kommissur, welche ebenfalls verbindende Fasern zwischen beiden Hemisphären enthalten. Das Kleinhirn, unter anderem wichtig für die Bewegungskoordination, wirkt deformiert und geschrumpft.

normales Gehirn

Blick auf die Mittelebene des Gehirns mittels Magnetresonanztomografie

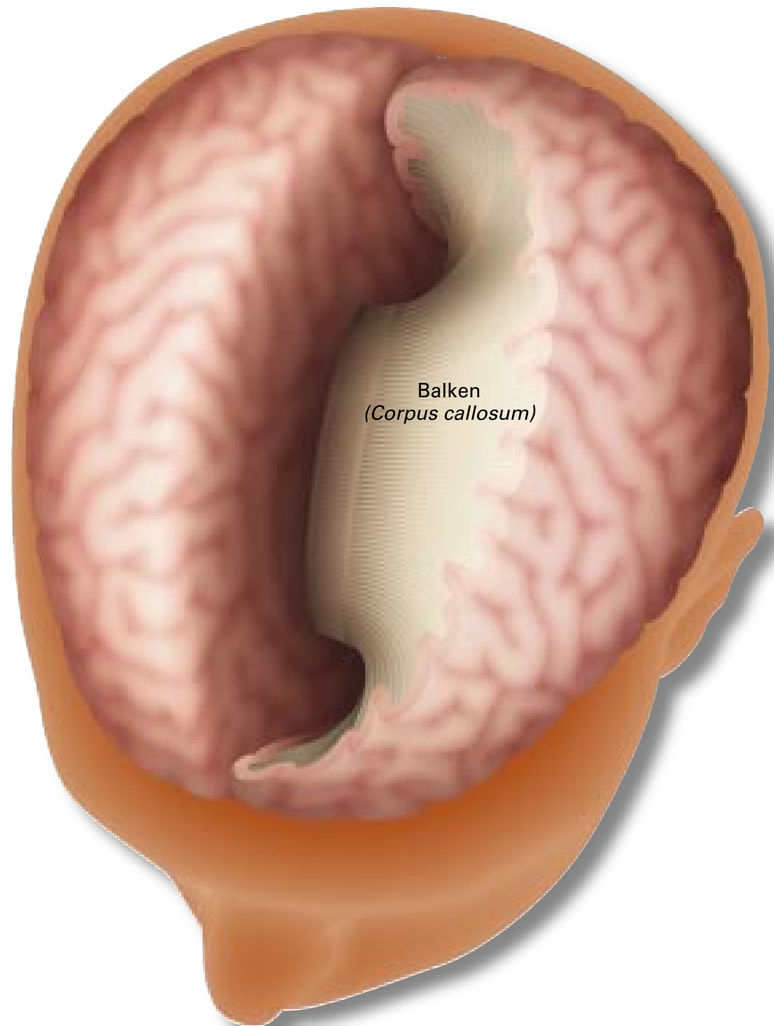


Gehirn von Kim Peek



Blick in ein normales Gehirn

Eine breite Faserstruktur unter der Oberfläche verbindet die beiden Hemisphären



MRI-SCANS: PRATIK MUKHERJEE UND DONNA R. ROBERTS, UCSF; GRAFIK RECHTS: SARA CHEN

dings ein stark ausgeprägtes Spezialinteresse zu sein.

Peeks Neigungen äußerten sich zunächst alle in peniblem, quasi automatischem sofortigem Auswendiglernen, doch erweiterten sie sich später. Zu abstrahieren oder konzeptionell zu denken, gelingt ihm nur eingeschränkt. Gängige Sprichwörter etwa vermag er meist nicht zu erklären. Aber vieles von dem, was er seinem Gedächtnis einverleibt hat, versteht er durchaus. Für ein Savant-Syndrom ist dieser Grad von Begreifen ungewöhnlich. Der Londoner Arzt Down meinte einst dazu, Betroffene würden sozusagen »an den Worten kleben«, ohne ihnen Sinn zuzuordnen. Ein anderes eingängiges Bild fand die Psychologin Sarah Parker von der Universität von Pennsylvania in Philadelphia: »Wenn man einen Brennofen voller Ziegel hat, ist man noch längst kein Maurer.«

Aber Peek besitzt nicht nur einen außerordentlich großen Brennofen voller Ziegel, er ist heute auf seinen Gebieten auch ein gewandter, kreativer Wortmaurer. Einerseits reagiert er mitunter auf Fragen oder Anweisungen verblüffend wörtlich. Als ihn sein Vater einmal im Restaurant bat, die Stimme zu senken, rutschte er einfach tiefer in den Stuhl, brachte somit den Kehlkopf tiefer. Andererseits kann er durchaus geistreich sein. Bei einem der Gespächsauftritte, die er seit Längerem zu geben pflegt, fragte jemand nach Abraham Lincolns »Gettysburg Address« (wobei *address* unter anderem »Ansprache« bedeutet; Präsident Lincoln hatte dort, am Ort einer entscheidenden Schlacht des Amerikanischen Bürgerkriegs, 1863 seine berühmteste, eine ganz kurze Rede gehalten). Peek aber antwortete: »Will's House, 227 North West Front Street. Dort schlief er aber nur eine Nacht – am nächsten Tag hielt er die Rede.« Er wollte keinen Scherz machen. Als der Frager lachte, erkannte er aber den Witz und benutzt ihn seitdem, um sein Publikum zu erheitern, was ihm auch gelingt.

Andererseits besitzt Peek für situationsbezogene Gedankenspiele zweifellos ein Talent. Oft verblüfft er mit seinen Schöpfungen, etwa wenn er ein Shakespeare-Zitat passend abwandelt. Das erinnert durchaus an das Improvisieren eines Musikers. Die Einfälle kommen Peek ganz rasch, oft ist er seinen Zuhörern anscheinend mehrere Denkschritte voraus, sodass man den verschlungenen Assoziationen mitunter so schnell gar nicht zu folgen vermag.



ETHAN HILL

Seit Kurzem zeigt sich eine neue Dimension seines Savant-Talents, die überrascht. Im Jahre 2002 lernte Peek die Musikprofessorin April Greenan kennen. Unter ihrer Anleitung begann er Klavier zu spielen und in Gesprächen über Musikstücke Passagen daraus auf den Tasten zu zitieren. Viele von den Werken, die er ohnehin im Kopf hat, bringt er so zu Gehör.

Anklänge an Mozarts Genie?

Peek verfügt über ein bemerkenswertes Gedächtnis für Tonhöhen. Zu jeder Komposition weiß er die Originallage. Auch kennt er sämtliche Instrumente eines klassischen Sinfonieorchesters und kann für einzelne Abschnitte der Stücke angeben, wie sich der Gesamtklang zusammensetzt. Den Anfang der »Moldau« von Smetana spielte er so: Flöte und Klarinette markierte er mit einem Arpeggio mit der linken Hand. Oboe und Fagott, erklärte er, würden mit dem Thema einsetzen. Das Thema spielte er rechts, erst in Einzeltönen, dann in Terzen, während er links weiter das übrige Orchester andeutete. Dass er Musikstile zu unterscheiden vermag, zeigt sich, wenn er neue Stücke hört und mutmaßt, von welchem Komponisten sie sein könnten.

Körperlich ist Kim Peek immer noch höchst linkisch und unbeholfen. Seine manuelle Geschicklichkeit aber nimmt zu. Sitzt er am Klavier und möchte über ein Stück sprechen, dann spielt er die betreffende Passage, oder er singt sie, oder er beschreibt sie mit Worten, wobei er nahtlos hin- und herwechselt. Auch den Rhythmus beachtet er: Den Takt klopft er sich mit der rechten Hand leicht auf die Brust oder tippt beim Klavierspielen mit dem rechten Fuß auf den Boden.

Seine Lehrerin ist Mozart-Kennerin. Sie sagt über ihren Schüler: »Kims Musikkenntnisse sind beachtlich. Erstaunlich, wie er sich an jede Einzelheit der Stücke erinnert. Viele hat er nur einmal gehört, teils vor über 40 Jahren. Wie er alles verkettet und Fäden verwebt, ob durch ein Musikwerk oder zwischen verschiedenen Kompositionen, wie er Verbindungen zum Leben der Komponisten herstellt, zu geschichtlichen Ereignissen, zu Filmmusiken und zu tausenderlei Fakten aus seiner ›Datenbank‹, zeugt von einer riesigen intellektuellen Kapazität.« Die Musikerin vergleicht Peek sogar mit Mozart. Der habe auch einen ziemlich

◀ **Seit ein paar Jahren lernt Kim Peek Klavierspielen und macht dabei beachtliche Fortschritte (rechts sein Vater, hinten seine Lehrerin April Greenan).**

großen Kopf besessen, ein Faible für Zahlen gehabt und sei im sozialen Bereich eher schwierig gewesen. Sie könnte sich sogar vorstellen, dass Kim noch komponieren lernt.

Wundert es da, dass die Aufmerksamkeit des Drehbuchautors Barry Morrow geweckt war, als er den Mann mit dem ungeheuren Gedächtnis 1984 zufällig kennen lernte? So entstand der bekannte Film »Rain Man«. Die Hauptfigur Raymond Babbitt, gespielt von Dustin Hoffman, ist allerdings anders als Kim Peek ein autistischer Savant. Die Geschichte ist auch sonst völlig fiktiv. Nicht einmal in groben Zügen erzählt sie Peeks Lebensweg. Doch in einer Szene rechnet Raymond immerfort im Kopf Quadratwurzeln aus. Da murmelt sein Filmbruder Charlie: »Er müsste für die Nasa arbeiten oder sowas.« Peek könnte das tatsächlich erleben.

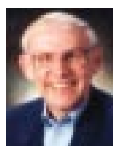
Denn die Nasa möchte von seinem Gehirn und dessen Arbeitsweise ein präzises dreidimensionales anatomisches Modell erstellen. Laut Richard Boyle, dem Direktor des Biovis-Technologiezentrums der Nasa, geschähe das im Rahmen eines Unterfangens, bei dem möglichst viele und unterschiedlichste Gehirne im Detail aufgenommen werden sollen. Die Daten würden dann so zusammengeführt, dass Strukturen und Funktionen aufeinander bezogen werden können. Hieran möchten die Forscher festmachen, welche Veränderungen an welchen Stellen im Gehirn Denken und Verhalten begleiten. Mit Hilfe eines solchen detaillierten Modells sollen einmal Ärzte von der Erde aus die nicht sonderlich genauen Ultraschall-Hirnaufnahmen von Raumfahrern besser interpretieren können, denn bisher kann man nur Ultraschallgeräte ins All transportieren.

»Rain Man« brachte für Peek die Wende. Vorher hatte er sich vor Menschen zurückgezogen und sich, wenn Besuch kam, in seinem Zimmer verkrochen. Die Kontakte mit den Filmleuten erhöhten sein Selbstvertrauen. Als ihn der Film dann berühmt machte, entschlossen sich er und sein Vater, die abnorme Begabung einem Publikum vorzuführen. Die beiden wurden dabei zu engagierten Botschaftern für Behinderte. Im Lauf der Jahre sind sie vor über 2,6 Millionen Menschen aufgetreten.

Die Verwandlung Peeks sollte uns zu denken geben, aus wissenschaftlicher Sicht wie für den praktischen Umgang mit Menschen wie ihm. Zum einen: Vieles von dem, was wir über Gesundheit wissen, rührt von der Erforschung pathologischer Zustände her. Ähnlich dürften ungewöhnliche Erinnerungsfähigkeiten dazu beitragen, das normale Gedächtnis besser zu begreifen.

Zum anderen aber kann das Leben dieses Mannes Vorbild sein, wie man ähnlich veranlagte behinderte Menschen am besten fördert. Wir empfehlen, dass Bezugspersonen und Sorgeberechtigte die Sonderbegabungen nicht ignorieren oder gar unterdrücken, vielmehr ein Savant-Talent noch fördern und unterstützen. Womöglich lassen sich über das spezielle Können besser Kontakte zu Menschen knüpfen, so wie ein gezieltes Training der Spezialbegabung helfen könnte, die Einschränkungen des Betroffenen zu mildern. Das ist alles andere als leicht. Immer bedeutet es viel Hingabe, äußerste Geduld und harte Arbeit – wie es Peeks Vater so eindrucksvoll vorführt. Von Kim Peek können wir nicht nur als Forscher, sondern auch als Menschen viel lernen. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE





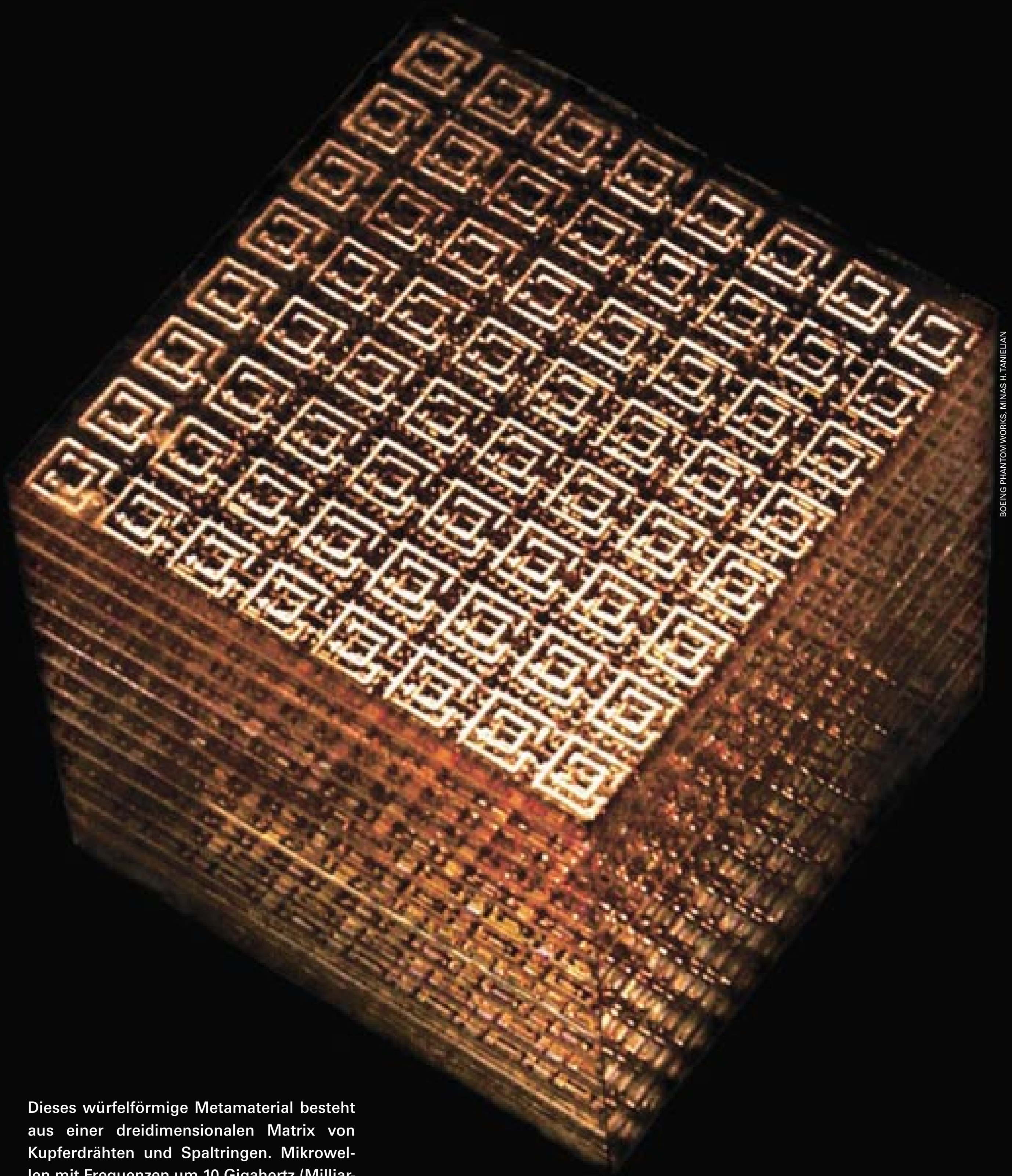
Darold A. Treffert (oben) und **Daniel D. Christensen** erforschen das Savant-Syndrom seit Jahrzehnten. Der Mediziner und Psychiater Treffert war an verschiedenen Orten des US-Bundesstaats Wisconsin in maßgeblichen Positionen tätig und fungierte beim Film »Rain Man« als Berater. Christensen hat Professuren für Psychiatrie, Neurologie und Pharmakologie an der Universität von Utah in Salt Lake City. Kim Peek kennt er seit über 20 Jahren.

Geistes-Giganten. Von Karin Steinberger in: SZ-Wissen, Heft 10, Juli/August 2006, S. 82

Inselbegabungen. Von D. A. Treffert und G. L. Wallace in: Spektrum der Wissenschaft, 9/2002, S. 44

The real Rain Man. Von Fran Peek. Harkness Publishing Consultants, 1996

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



BOEING PHANTOM WORKS, MINAS H. TANIELIAN

Dieses würfelförmige Metamaterial besteht aus einer dreidimensionalen Matrix von Kupferdrähten und Spaltringen. Mikrowellen mit Frequenzen um 10 Gigahertz (Milliarden Hertz) verhalten sich in dem Würfel höchst ungewöhnlich: Für sie hat das Material einen negativen Brechungsindex. Der Gitterabstand beträgt 2,68 Millimeter.

Die Superlinse

Aufwändig produzierte Strukturen – so genannte Metamaterialien – zeigen bizarre optische Eigenschaften, unter anderem einen negativen Brechungsindex. Eine Superlinse aus solchem Material vermag Bilder zu erzeugen, deren Details noch feiner sind als die verwendete Wellenlänge.

Von John B. Pendry und David R. Smith

Vor fast vierzig Jahren erdachte der russische Wissenschaftler Victor Veselago ein Material, das die Gesetze der Optik auf den Kopf zu stellen versprach. Lichtwellen würden darin ein völlig überraschendes Verhalten zeigen und sich beispielsweise rückwärts ausbreiten. Eine Linse aus diesem Material hätte fast magische Eigenschaften und könnte Unglaubliches leisten. Das Problem war nur: Das Material müsste einen negativen Brechungsindex haben. Diese Zahl gibt an, wie eine Welle ihre Richtung ändert, wenn sie in das Material eintritt oder es verlässt; bei allen bislang bekannten Substanzen ist ihr Wert positiv. Trotz jahrelanger Suche fand Veselago nichts, das die gewünschten elektromagnetischen Eigenschaften aufwies, und seine Idee verschwand in der Versenkung.

Erst kürzlich erweckte eine unerwartete Entdeckung Veselagos Gedanken zu neuem Leben. Bei den meisten Materialien ergibt sich das elektromagnetische Verhalten unmittelbar aus den charakteristischen Eigenschaften ihrer kleinsten Bausteine, der Atome und Moleküle. Da die Vielfalt dieser elementaren Charakteristika begrenzt ist, verfügen die Millionen der uns bekannten Werkstoffe nur über eine begrenzte Palette elektromagnetischer Eigenschaften. Doch Mitte der 1990er Jahre erkannte einer von uns (Pendry) zusammen mit Forschern der Firma Marconi Materials Technology in Großbritannien, dass ein optisches Material nicht aus einer einzigen, homogenen Substanz bestehen muss. Seine elektromagnetischen Eigenschaften könnten vielmehr aus winzigen Mikrostrukturen resultieren, die gemeinsam völlig exotisch anmutende Effekte erzeugen.

Das Marconi-Team fabrizierte solche »Metamaterialien« und bewies, dass sie elektromagnetische Wellen anders streuen als jede bekannte Substanz. Im Jahr 2000 entdeckte einer von uns (Smith) mit seinen Kollegen an der Universität von Kalifornien in San Diego eine Kombination von Metamaterialien, die tatsächlich einen negativen Brechungsindex aufweist.

Veselagos Traum

In Materialien mit negativer Brechzahl benimmt sich Licht derart seltsam, dass die Theoretiker die Lehrbücher über Elektromagnetismus umschreiben müssen – und gelegentlich sogar noch darüber streiten, ob solche Materialien überhaupt existieren. Unterdessen arbeiten die Experimentalphysiker bereits an praktischen Anwendungen für Metamaterialien. Zum Beispiel verspricht eine Superlinse das Abbilden von Details, die feiner sind als die Wellenlänge des verwendeten Lichts; damit ließe sich die optische Lithografie miniaturisierter Schaltkreise bis in die Größenordnung von Nanometern (millionstel Millimetern) vorantreiben, und auf optischen Speicherscheiben hätten viel mehr Daten Platz. Noch sind solche Visionen ein gutes Stück von der Realität entfernt, aber seit Veselagos Traum verwirklicht wurde, schreitet die Entwicklung rapide voran.

Um zu verstehen, wie negative Brechung entstehen kann, muss man wissen, wie ein Material elektromagnetische Wellen beeinflusst. Wenn eine solche Welle – beispielsweise ein Lichtstrahl – eine Substanz durchquert, erfahren die Hüllenelektronen der Atome oder Moleküle dieses Materials eine Kraft und bewegen sich entsprechend. Diese Bewegung zehrt die Energie der Welle teilweise auf und beeinflusst die Eigenschaften und die Bewegungsrichtung der Welle. Deshalb sieht ein halb in Wasser getauchter Bleistift geknickt aus. Indem Wissenschaftler die chemische Zusammensetzung eines Materials verändern, können sie seine optischen Eigenschaften an eine spezielle Anwendung anpassen.

Doch wie die Metamaterialien zeigen, ist Chemie nicht der einzige Zugang zu Substanzen mit interessantem elektromagnetischem Verhalten. Wir können auch die winzige, aber immer noch makroskopische Struktur des Materials manipulieren. Auch dies verändert das optische Verhalten, weil die Wellenlänge eines typischen Lichtstrahls um ein Vielfaches größer ist als die Atome oder Moleküle des Materials. Die Welle nimmt gleichsam nicht einzelne Moleküle wahr, sondern die gemeinsame Reaktion von Millionen Molekülen.

Wie der Name sagt, enthalten elektromagnetische Wellen ein elektrisches und ein magnetisches Feld. Jede der beiden Komponenten verursacht eine charakteristische Bewegung der Elektronen im Material – vorwärts und rückwärts als Reaktion auf das elektrische Feld, im Kreis herum infolge des magnetischen Felds. Dementsprechend geben zwei Parameter an, wie stark das Material reagiert: die elektrische Permittivität (oder Dielektrizitätskonstante) ε und die magnetische Permeabilität μ. Bei den meisten Materialien sind beide Größen positiv. ▷

▷ Ein weiterer wichtiger Indikator für das optische Verhalten einer Substanz ist der Brechungsindex n. Er hängt mit ε und μ zusammen nach der einfachen Formel: $n = \pm\sqrt{\varepsilon\mu}$. Für jedes bekannte Material muss für die Quadratwurzel der positive Wert eingesetzt werden; darum ist der Brechungsindex positiv. Doch wie Veselago 1968 zeigte, muss n negatives Vorzeichen annehmen, wenn sowohl ε als auch μ negativ sind. Das heißt, ein Material mit negativem ε und μ hat einen negativen Brechungsindex.

Ein negatives ε oder μ bedeutet, dass die Elektronen im Material sich entgegengesetzt zu der Kraft bewegen, die das elektrische oder magnetische Feld ausübt. Dieses Verhalten erscheint nur auf den ersten Blick paradox; eigentlich lassen sich Elektronen ganz einfach dazu bringen, dem »Stoß« der angelegten elektrischen und magnetischen Felder zu widerstehen.

Stellen wir uns eine Schaukel vor: Wenn wir sie langsam und stetig anstoßen, bewegt sich die Schaukel gehorsam in Richtung des Stoßes; sie schwingt allerdings nicht sehr weit. Einmal in Bewegung gesetzt, tendiert die Schaukel zu einer charakteristischen Eigenschwingung mit der so genannten Resonanzfrequenz.

Wird die Schaukel periodisch im richtigen Takt angestoßen, schwingt sie immer weiter und höher. Nun versuchen wir, in kürzeren Abständen zu stoßen – und der Stoß gerät aus dem Takt mit der Schaukelschwingung. Gelegentlich sind die Arme schon ausgestreckt, wenn die Schaukel ankommt. Die Schaukel könnte von früheren Stößen sogar genug Schwung haben, uns umzuwerfen – sie stößt zurück. Genauso geraten die Elektronen in einem Material mit negativem Brechungsindex außer Phase und widersetzen sich dem »Stoß« des elektromagnetischen Felds.

Der Schlüssel zu dieser negativen Reaktion ist Resonanz – die Tendenz, mit einer bestimmten Frequenz zu schwingen. Diese Eigenschaft wird einem Metamaterial künstlich verliehen, indem winzige Stromkreise das magnetische oder elektrische Verhalten eines Materials imitieren. In einem Spaltringresonator zum Beispiel induziert ein magnetischer Fluss beim Durchqueren der Metallringe rotierende Ströme, analog zum Magnetismus in üblichen Materialien (siehe Kasten auf S. 78). In einem Gitter aus geraden Metalldrähten verursacht ein elektrisches Feld hingegen vor- und zurücklaufende Ströme.

Winzige elektromagnetische Schaukeln

Wenn man die Elektronen sich selbst überlässt, schwingen sie in diesen Stromkreisen einfach hin und her, und zwar mit der durch Struktur und Größe der Stromkreise festgelegten Resonanzfrequenz. Wird ein Wechselfeld unterhalb dieser Frequenz angelegt, so reagiert das System normal, das heißt positiv. Knapp oberhalb der Resonanzfrequenz jedoch ist die Reaktion negativ – wie bei der Schaukel, die zurückstößt, wenn man sie schneller als mit ihrer Eigenfrequenz anstößt. Somit können Drähte in einem gewissen Frequenzbereich eine elektrische Reaktion mit negativem ε liefern, während Spaltringe im selben Frequenzband eine magnetische Reaktion mit negativem μ erzeugen können. Diese Drähte und Spaltringe sind genau die Bausteine, aus denen sich ein breites Sortiment von interessanten Metamaterialien fabrizieren lässt – darunter auch Veselagos lange gesuchtes Material.

Der erste experimentelle Hinweis auf eine negativ brechende Substanz kam 2000 von der Gruppe in San Diego. Da die Elemente eines Metamaterials unbedingt viel kleiner sein müssen als die Wellenlänge, verwendete die Gruppe Mikrowellen. Deren Wellenlänge beträgt mehrere Zentimeter; also konnten die Elemente mehrere Millimeter groß sein – ein recht praktisches Ausmaß.

Das Team konstruierte ein Metamaterial, das abwechselnd aus Drähten und Spaltringresonatoren bestand, und gab ihm die Form eines Prismas. Die Drähte lieferten negatives ε, die Ringe negatives μ, darum sollten beide zusammen einen negativen Brechungsindex ergeben. Zum Vergleich stellten die Forscher auch ein gleich geformtes Prisma aus Teflon her; diese Substanz hat eine positive Brechzahl mit $n = 1{,}4$. Nun richteten sie einen Mikrowellenstrahl auf das Prisma und maßen die austretenden Mikrowellen unter verschiedenen Winkeln. Wie erwartet wurde der Strahl im Teflonprisma positiv gebrochen, im Metamaterial hingegen negativ. Damit war Veselagos Spekulation Wirklichkeit geworden: Endlich gab es ein Material mit negativem Brechungsindex. – Wirklich?

Die Experimente in San Diego und die spektakulären Hoffnungen, die sie weckten, riefen andere Forscher auf den Plan. Skeptiker meinten, negativ brechende Materialien müssten die physikalischen Grundgesetze verletzen. Wenn sie damit Recht hatten, lief das ganze Forschungsprogramm in die Irre.

Eine besonders heftige Debatte konzentrierte sich auf unsere Auffassung der Wellengeschwindigkeit in einem komplizierten Material. Im Vakuum ist die Lichtgeschwindigkeit c mit 300 000 Kilometer pro Sekunde am größten. In einem optischen Medium sinkt sie um einen Faktor, der dem Brechungsindex entspricht, das heißt, für die Geschwindigkeit gilt $v = c/n$. Aber was wird aus dieser Formel, wenn n negativ ist? Gemäß der einfachsten Interpretation pflanzt das Licht sich dann rückwärts fort.

Eine genauere Antwort berücksichtigt, dass eine Welle zwei Geschwindigkeiten hat, die Phasen- und die Gruppengeschwindigkeit. Stellen wir uns einen Lichtpuls vor, der durch ein Medium wandert. Er sieht etwa so aus wie die Zeichnung ganz unten im Kasten auf S. 77). Die Amplitude der Wellenberge und -täler wächst bis zur Pulsmitte auf ein Maximum und nimmt dann wieder bis auf null ab. Die Phasengeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit der einzelnen Berge und Täler. Die Gruppengeschwindigkeit gibt an, wie schnell sich ▷

IN KÜRZE

▶ **Metamaterialien** werden aus sorgfältig geformten mikroskopischen Strukturen aufgebaut. Sie bekommen dadurch elektromagnetische Eigenschaften, die keine natürlich vorkommende Substanz aufweist – insbesondere können sie Licht auf völlig neuartige Weise brechen.

▶ **Eine Superlinse** ist eine Schicht aus Material mit negativem Brechungsindex. Sie kann im Prinzip feinere Details abbilden als jede herkömmliche Linse mit positivem Brechungsindex.

▶ **Experimentell** werden Metamaterialien derzeit meist mit Mikrowellen erforscht, doch das Ziel sind noch feinere Superlinsen für infrarotes und sichtbares Licht.

Kuriose Eigenschaften eines negativ brechenden Mediums

In einem Metamaterial mit negativem Brechungsindex verhalten sich Licht und andere elektromagnetische Wellen in mehrfacher Hinsicht völlig anders als gewohnt.

Medium mit positiver Brechzahl

Medium mit negativer Brechzahl

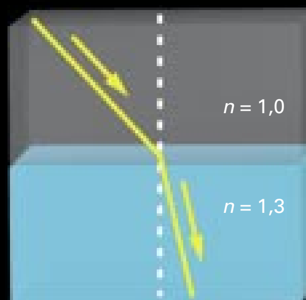
Ein halb in Wasser getauchter Bleistift erscheint geknickt, weil der Brechungsindex von Wasser höher ist als der von Luft.

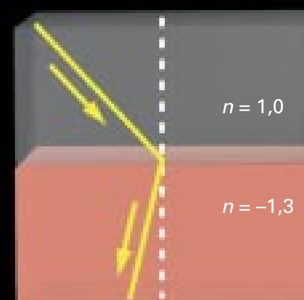




In einem negativ brechenden Medium wird der Bleistift scheinbar komplett aus dem Medium heraus geknickt.

Wenn Licht von einem Medium mit niedrigem Brechungsindex n in eines mit höherem Index übergeht, wird es zur Normalen (gestrichelte Linie) hin gebrochen.





Wenn Licht von einem Medium mit positivem Brechungsindex in eines mit negativem Index übergeht, wird es komplett zurück zu derselben Seite der Normalen gebrochen.

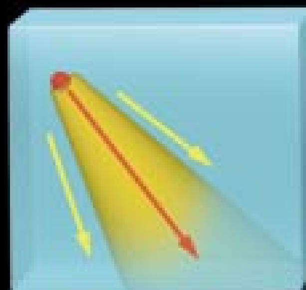
Ein Objekt, das sich in einem Medium mit positivem Index vom Beobachter entfernt, erscheint infolge des Doppler-Effekts röter.

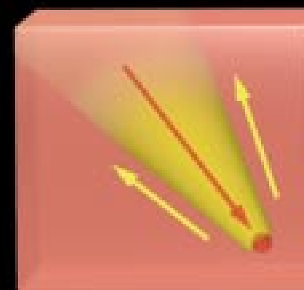




In einem Medium mit negativem Index erscheint ein sich entfernendes Objekt blauer.

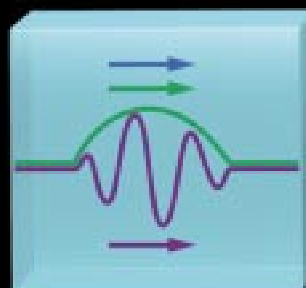
Ein geladenes Objekt (rot), das sich in einem positiv brechenden Medium schneller als die darin geltende Lichtgeschwindigkeit bewegt, erzeugt einen Kegel aus Cerenkov-Strahlung (gelb) in Vorwärtsrichtung.

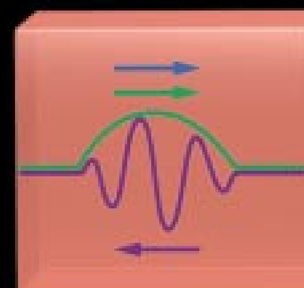




In einem negativ brechenden Medium weist der Kegel rückwärts.

In einem Medium mit positivem Index wandern die Berge und Täler eines elektromagnetischen Pulses (violett) in dieselbe Richtung wie der gesamte Puls (grün) und die Energie (blau).





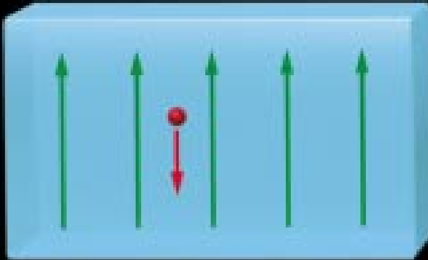
In einem negativ brechenden Medium wandern die Einzelschwingungen entgegengesetzt zum Gesamtpuls und zur Energie.

MELISSA THOMAS

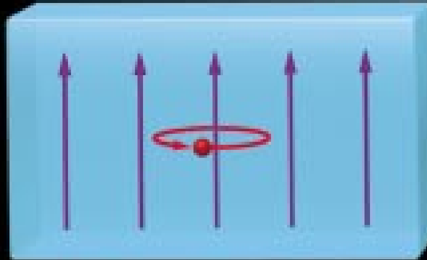
Ein künstliches Medium unter der Lupe

Ein Metamaterial reagiert höchst »unnatürlich« auf elektrische und magnetische Felder, weil es aus speziell konstruierten Mikrostrukturen aufgebaut ist.

In einem gewöhnlichen Material

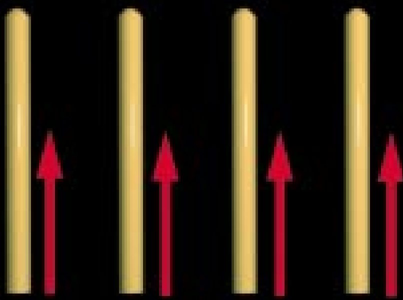


Ein elektrisches Feld (grün) erzeugt eine geradlinige Bewegung der Elektronen (rot).



Ein Magnetfeld (violette Pfeile) induziert eine kreisförmige Bewegung der Elektronen.

In einem Metamaterial



Geradlinige Ströme (rote Pfeile) fließen in parallel angeordneten Drähten.



Kreisförmige Ströme fließen in Spaltringresonatoren; diese können auch quadratisch sein.

Struktur eines Metamaterials





Ein Metamaterial besteht aus abwechselnd angeordneten Drähten und Spaltringresonatoren, die kleiner sein müssen als die Wellenlänge der verwendeten elektromagnetischen Strahlung. Um in drei Dimensionen zu funktionieren, muss das Metamaterial aus Drähten und Spaltringen in drei zueinander senkrechten Richtungen zusammengesetzt sein. Das hier skizzierte Metamaterial ist zweidimensional: Die Drähte und Spaltringe wechseln einander nur in zwei Richtungen ab.

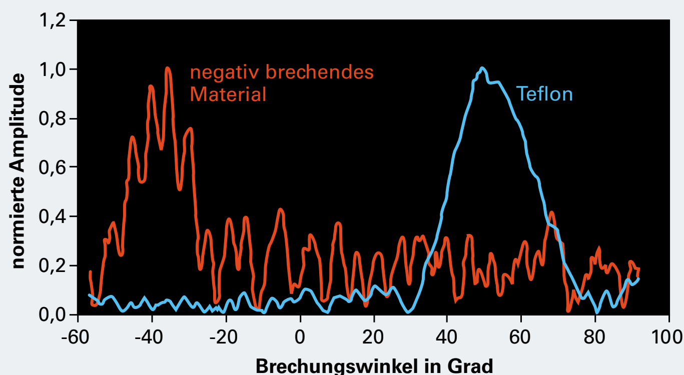
▷ der gesamte Puls fortpflanzt. Diese beiden Größen müssen nicht gleich sein.

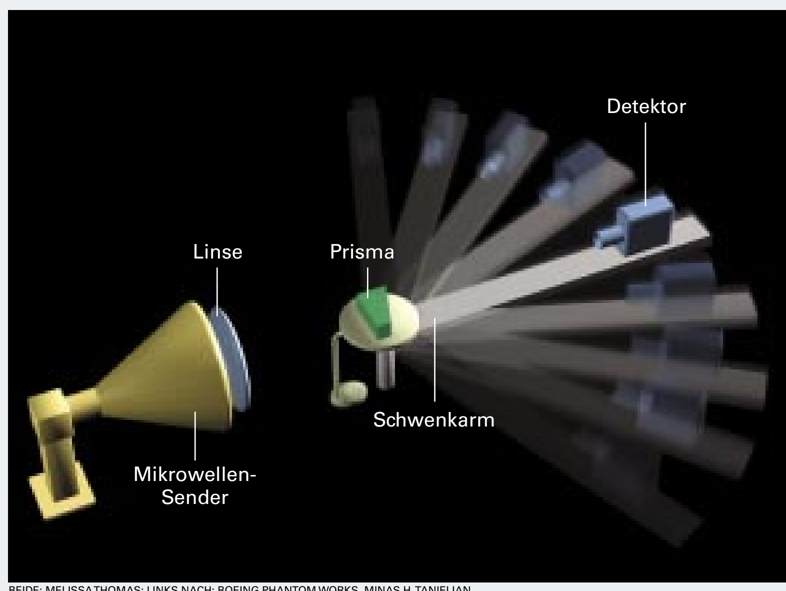
Wie Veselago entdeckt hatte, weisen Gruppen- und Phasengeschwindigkeit in einem Material mit negativer Brechzahl in entgegengesetzte Richtungen. Überraschenderweise wandern die einzelnen Pulsschwingungen rückwärts, obwohl der gesamte Puls vorwärtsstrebt. Diese Tatsache hat auch für einen kontinuierlichen Lichtstrahl erstaunliche Konsequenzen – etwa für eine Taschenlampe, die völlig von negativ brechendem Material umgeben ist. Könnte man die einzelnen Berge und Täler der Lichtwelle beobachten, so würden sie vom Zielpunkt des Strahls ausgehen, den Strahl entlang rückwärtslaufen und schließlich in der Lampe verschwinden, als würde man einen verkehrt abgespielten Film betrachten. Dennoch wandert die Energie des Lichtstrahls wie üblich vorwärts, von der Lampe weg. Das ist die eigentliche Ausbreitungsrichtung des Strahls, ungeachtet der erstaunlichen Rückwärtsbewegung der Berge und Täler.

Verwirrende Wellenmuster

In der Praxis ist es nicht leicht, die einzelnen Schwingungen einer Lichtwelle zu untersuchen, und die Details eines Pulses können recht kompliziert sein. Darum benutzen die Physiker oft einen Trick, um den Unterschied zwischen Phasen- und Gruppengeschwindigkeit zu veranschaulichen. Wenn wir zwei Wellen gleicher Richtung, aber etwas unterschiedlicher Wellenlänge addieren, interferieren sie und erzeugen ein Schwebungsmuster, das heißt eine regelmäßige Folge von größeren und kleineren Amplituden. Diese Schwebungen bewegen sich mit der Gruppengeschwindigkeit.

Als Prashant M. Valanju und seine Mitarbeiter an der Universität von Texas in Austin dieses Prinzip 2002 auf das Brechungsexperiment von San Diego anwandten, beobachteten sie etwas Seltsames. Wenn zwei Wellen unterschiedlicher Wellenlänge die Grenzfläche zwischen einem negativ und einem positiv brechenden Material passieren, werden sie unter etwas unterschiedlichen Winkeln gebrochen. Das resultierende Schwebungsmuster folgt aber nicht den negativ gebrochenen Strahlen, sondern scheint positive Brechung aufzuweisen. Die Forscher aus Texas setzten dieses Schwebungsmuster mit der Gruppengeschwindigkeit gleich und schlossen da-





Ein Experiment der Firma Boeing Phantom Works in Seattle bewies das Phänomen der negativen Brechung. Während ein herkömmliches, positiv brechendes Prisma aus Teflon die Mikrowellen um einen positiven Winkel ablenkte (blaue Kurve), brach das Metamaterial den Mikrowellenstrahl in negativem Winkel (rote Kurve).

BEIDE: MELISSA THOMAS; LINKS NACH: BOEING PHANTOM WORKS, MINAS H. TANIELIAN

raus, dass jede physikalisch realisierbare Welle positiv gebrochen wird. Obwohl ein Material mit negativem Brechungsindex existieren könnte, wäre negative Brechung unmöglich.

Angenommen, die Texas-Physiker hatten Recht, wie ließen sich dann die Resultate der San-Diego-Experimente erklären? Valanju und viele andere Forscher schrieben die anscheinend negative Brechung einer Vielfalt anderer Phänomene zu. Absorbierte die Probe vielleicht in Wirklichkeit so viel Energie, dass Wellen nur aus der Schmalseite des Prismas austreten konnten und dadurch den falschen Eindruck erweckten, sie seien negativ gebrochene Wellen? Immerhin wirkte die San-Diego-Probe stark absorbierend, und die Messungen waren nicht sehr weit vom Prisma entfernt vorgenommen worden; darum wirkte diese Absorptionstheorie plausibel.

Die Einwände gaben Anlass zu großer Sorge, denn sie stellten nicht nur die San-Diego-Experimente in Frage, sondern auch alle Phänomene, die Veselago vorhergesagt hatte. Doch nach einigem Nachdenken erkannten wir, dass es falsch war, das Schwebungsmuster als Indikator der Gruppengeschwindigkeit zu deuten. Bei zwei Wellen mit unterschiedlicher Ausbreitungsrichtung verliert das resultierende Interferenzmuster seinen Bezug zur Gruppengeschwindigkeit.

Während die Argumente der Kritiker allmählich in sich zusammenfielen, gab es weitere experimentelle Indizien für negative Brechung. Die Gruppe um Minas Tanielian bei der Firma Boeing Phantom Works in Seattle wiederholte die San-Diego-Experimente mit einem sehr schwach absorbierenden Prisma aus Metamaterial. Das Boeing-Team platzierte den Detektor außerdem viel weiter vom Prisma entfernt; dadurch konnte Absorption im Metamaterial als Ursache des negativ gebrochenen Strahls ausgeschlossen werden. Die hohe Qualität der Boeing-Daten und weiterer Experimente machte schließlich dem Zweifel an der Existenz negativer Brechung ein Ende. Nun konnten wir das Prinzip ungehindert weiter erforschen – allerdings ernüchtert durch die Tücken der neuen Materialien.

Der Streit legt sich, die Probleme werden deutlicher

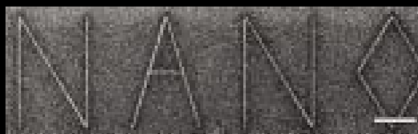
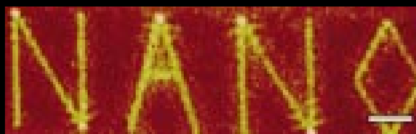
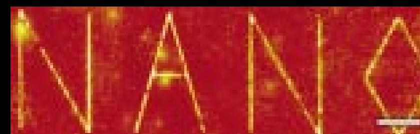
Nachdem der Streit sich gelegt hatte, erkannten wir allmählich, dass Veselagos Geschichte über das Verhalten von Licht in negativ brechenden Strukturen nicht das letzte Wort sein konnte. Sein Hauptwerkzeug war die Strahlverfolgung *(ray tracing)*. Dabei zeichnet man mit Geradenstücken den Weg eines idealisierten Lichtstrahls nach. Damit lassen sich Reflexion und Brechung an der Grenzfläche verschiedener Materialien darstellen.

Die Strahlverfolgung ist eine vielseitige Technik; sie erklärt etwa, warum Objekte in einem Schwimmbecken weniger tief unter der Oberfläche zu liegen scheinen als in Wirklichkeit oder warum ein halb eingetauchter Bleistift geknickt erscheint. Lichtstrahlen werden an der Grenzfläche zwischen Luft und Wasser gebrochen, weil der Brechungsindex von Wasser mit $n = 1{,}3$ größer ist als der von Luft, welcher nur knapp über 1 liegt. Der Brechungsindex ist ungefähr gleich dem Verhältnis der wirklichen zur scheinbaren Tiefe.

David Schurig von der Duke-Universität in Durham (North Carolina) zeigte mittels Strahlverfolgung, dass Kinder, die in einem Becken mit negativem Index schwimmen, über dem Wasserspiegel zu treiben scheinen. Auch der gesamte Inhalt des Beckens – und die Beckenwände – erscheinen über der Oberfläche.

Veselago kam mit Hilfe der Strahlverfolgung zu dem Schluss, eine Scheibe aus negativ brechendem Material mit Index $n = -1$ müsse als Linse mit nie dagewesenen Eigenschaften wirken. Wir alle sind mit positiv brechenden Linsen vertraut – in Lupen, Kameras, Mikroskopen und Ferngläsern. Sie haben eine charakteristische Brennweite, und wo ein Bild entsteht, hängt ab von der Brennweite sowie vom Abstand zwischen Objekt und Linse. Die Bilder sind meist größer oder kleiner als das Objekt, und die Linsen liefern die besten Bilder, wenn das Objekt auf der Linsenachse liegt. Veselagos Linse funktioniert ganz anders (siehe Bild S. 80). Sie wirkt nur auf nahe Objekte und überträgt das gesamte optische Feld von einer Seite der Linse auf die andere.

Die Veselago-Linse ist so ungewöhnlich, dass Pendry sich fragen musste, wie gut sie überhaupt zu funktionieren vermag. Wie fein würde insbesondere ihre Auflösung sein? Optische Elemente mit positivem Brechungsindex werden durch die so genannte Beugungsgrenze eingeschränkt: Sie können bestenfalls Details auflösen, die mindestens so groß sind wie die Wellenlänge des vom Objekt reflektierten Lichts. Die Beugung setzt allen Abbildungssystemen eine unübersteigbare Grenze; sie definiert das kleinste Objekt, das durch ein Mikroskop ▷

XIANG ZHANG, UNIVERSITY OF CALIFORNIA, BERKELEY

Auf sehr kurze Distanz wirkt eine dünne Silberschicht als Superlinse. Hier wird das Wort »NANO« mit einem fokussierten Ionenstrahl abgebildet (links), mit einer gewöhnlichen optischen Linse (Mitte) sowie optisch mit einer 35 Nanometer dicken Silberschicht (rechts). Der Maßstab ist jeweils 2000 Nanometer lang. Die Auflösung der Superlinse ist feiner als die Wellenlänge des verwendeten Lichts mit 365 Nanometern.

beobachtet werden kann, oder den kleinsten Abstand zweier Sterne, den ein Fernrohr aufzulösen vermag. Auch die kleinste Struktur, die einem Mikrochip durch optische Lithografie eingeprägt werden kann, wird durch Beugungsphänomene bestimmt. Ebenso begrenzt die Beugung die Datenmenge, die sich auf einer DVD optisch speichern oder von ihr ablesen lässt. Ein Überwinden dieser Grenze könnte die technische Optik revolutionieren: Die optische Lithografie könnte in den Nanometerbereich vorstoßen und am Ende die Kapazität optischer Datenspeicher verhundertfachen.

Über die Beugungsgrenze hinaus

Um festzustellen, ob eine Optik mit negativem Index wirklich die Grenzen herkömmlicher Geräte zu überwinden vermag, reicht die Strahlverfolgung nicht aus. Dies vernachlässigt die Beugung und kann darum die Auflösung negativ brechender Linien nicht vorhersagen.

Genau betrachtet erzeugen alle Quellen elektromagnetischer Wellen – ein angeregtes Atom, eine Radioantenne oder ein durch eine kleine Öffnung austretender Lichtstrahl – zwei unterschiedliche Felder: das Fernfeld und das Nahfeld. Wie sein Name sagt, ist das Fernfeld derjenige Teil, der in großer Entfernung von einem Objekt abgestrahlt wird; er kann durch eine Linse eingefangen werden, um ein Bild zu erzeugen. Leider enthält das Fernfeld nur ein grobes Abbild des Objekts, da die Beugung nur eine Auflösung bis zur Größe der Wellenlänge zulässt. Hingegen birgt das Nahfeld zwar sämtliche feinsten Details des Objekts, doch seine Intensität nimmt mit der Entfernung rapide ab. Positiv brechende Linsen, die in einigem Abstand vom Objekt funktionieren, haben keine Chance, das extrem schwache Nahfeld einzufangen und auf das Bild zu übertragen. Doch für negativ brechende Linsen gilt das nicht.

Im Jahr 2000 untersuchte Pendry eingehend, wie Nah- und Fernfeld einer Quelle auf die Veselago-Linse einwirken. Wie er zur allgemeinen Überraschung herausfand, vermag die Linse im Prinzip beide Feldtypen zu fokussieren. Wenn diese erstaunliche Vorhersage zutrifft, ist die Veselago-Linse nicht an die Beugungsgrenze der üblichen Optik gebunden. Die ebene Scheibe mit negativem Index wurde darum auf den Namen Superlinse getauft.

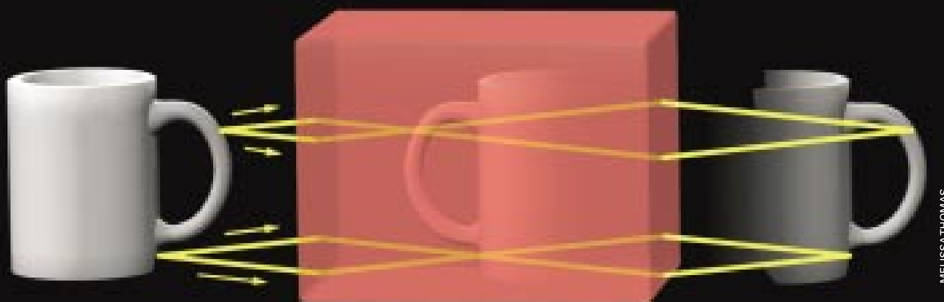
In weiteren Analysen entdeckten wir und andere, dass die Auflösung der Superlinse durch die Qualität ihres negativ brechenden Materials eingeschränkt wird. Für optimale Wirkung ist nicht nur ein Brechungsindex $n = -1$ nötig, sondern zugleich $\varepsilon = -1$ und $\mu = -1$. Eine Linse, die diesem Ideal nicht entspricht, liefert drastisch verschlechterte Auflösung. Diese Bedingungen gleichzeitig zu erfüllen ist schwierig. Doch wie Anthony Grbic und George V. Eleftheriades von der Universität Toronto 2004 experimentell zeigten, kann ein Metamaterial, auf das bei Radiofrequenzen sowohl $\varepsilon = -1$ als auch $\mu = -1$ zutrifft, tatsächlich Objekte bis zu einer Größenordnung auflösen, die kleiner ist als die Beugungsgrenze. Damit war zwar prinzipiell bewiesen, dass eine Superlinse fabriziert werden kann – aber nur für Radiowellen.

Wer Metamaterialien für noch kleinere optische Wellenlängen zwischen 400 und 700 Nanometern herzustellen versucht, steht vor zwei schwierigen Aufgaben. Erstens müssen die metallischen Bauelemente, welche die winzigen Stromkreise des Metamaterials bilden – insbesondere Drähte und Spaltringresonatoren –, bis in den Nanometerbereich miniaturisiert werden, damit sie ein gutes Stück kleiner sind als die Wellenlänge sichtbaren Lichts. Zweitens bedeuten die kurzen Wellenlängen höhere Frequenzen; bei diesen Frequenzen verhalten sich Metalle als schlechte Leiter und dämpfen die Resonanzen, auf denen Metamaterialien beruhen. Im Jahr 2005 konnten Costas Soukoulis von der Staatsuniversität Iowa und Martin Wegener von der Universität Karlsruhe Spaltringresonatoren vorführen, die immerhin bei Wellenlängen von nur 1,5 Mikrometern (tausendstel Millimetern) funktionieren. Obwohl die magnetische Resonanz bei diesen kurzen Wellenlängen recht schwach wird, lassen sich damit noch passable Metamaterialien bilden.

Doch bislang können wir noch kein Material fabrizieren, das bei sichtbaren Wellenlängen $\mu = -1$ liefert. Zum Glück gibt es einen Ausweg. Wenn der Abstand zwischen Objekt und Bild viel kleiner ist als die Wellenlänge, müssen wir nur die Bedingung $\varepsilon = -1$ erfüllen; um μ brau-

Wie die Superlinse funktioniert

Eine rechteckige Platte aus Material mit negativem Brechungsindex wirkt als Superlinse. Das von dem Objekt (links) ausgehende Licht (gelbe Linien) wird an der Oberfläche der Linse gebrochen und vereinigt sich innerhalb der Platte zu einem spiegelverkehrten Bild. Beim Austritt aus der Platte wird das Licht erneut gebrochen und erzeugt ein zweites Bild (rechts). Bei einigen Metamaterialien enthält das Bild sogar Details, die kleiner sind als die verwendete Wellenlänge.

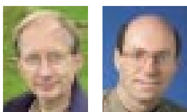


MELISSA THOMAS

chen wir uns dann nicht zu kümmern. Ende 2005 nutzten Richard Blaikie von der Universität Canterbury in Neuseeland sowie Xiang Zhang von der Universität von Kalifornien in Berkeley diesen Trick und demonstrierten Superauflösung in einem optischen System. Bei optischen Wellenlängen können die natürlichen Resonanzen in einem Metall zu negativer Permittivität ε führen. Darum vermag eine sehr dünne Metallschicht bei einer Wellenlänge, für die $\varepsilon = -1$ erfüllt ist, als Superlinse zu wirken. Beide Teams verwendeten eine rund 40 Nanometer dicke Silberschicht; das Licht trat aus speziellen Öffnungen aus, die kleiner waren als die verwendete Wellenlänge von 365 Nanometern. Zwar ist eine Silberschicht noch lange keine ideale Linse, aber schon die primitive Silber-Superlinse verbesserte die Bildauflösung erheblich und bewies, dass das Prinzip funktioniert. Angesichts solcher Effekte müssen die Physiker den Elektromagnetismus – insbesondere Brechung und Beugungsgrenze – neu überdenken.

Kürzlich haben wir (zusammen mit David Schurig) gezeigt, dass man mit Metamaterialien die elektromagnetischen Felder um ein Objekt sogar derart verzerren kann, dass es bei bestimmten Wellenlängen unsichtbar wird. Zwischen solchen Überlegungen und einer anwendbaren Technik türmen sich freilich noch vielerlei Hindernisse. Erst einmal muss die Konstruktion von Metamaterialien zugleich perfektioniert und verbilligt werden. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE



John B. Pendry (links) und **David R. Smith** entwickeln seit 2000 Metamaterialien, wobei Pendry sich auf die Theorie spezialisiert und Smith auf die Experimente. 2005 gewann ihr Team den Descartes-Forschungspreis der Europäischen Union. Pendry ist Physikprofessor am Imperial College in London, Smith Professor für Elektro- und Computertechnik an der Duke-Universität in Durham (US-Bundesstaat North Carolina).

Controlling electromagnetic fields. Von John B. Pendry, David Schurig und David R. Smith in: Science, Bd. 312, S. 1780, 2006

Negative-refraction metamaterials: fundamental principles and applications. Von G. V. Eleftheriades und K. Balmain. Wiley-IEEE Press, 2005

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

▶ **HINWEIS**: AUF DEN NÄCHSTEN 2 SEITEN FOLGT EIN SONDERTEIL DER DAB-BANK !

Die schwere Geburt des Amazonas

Nach neuesten Erkenntnissen dauerte es mehrere Millionen Jahre, bis der mächtigste Fluss der Erde sich seinen Weg quer durch Südamerika gebahnt hatte. Die wechselvolle Vergangenheit des Amazonasbeckens erklärt auch die Vielfalt seinerFlora und Fauna, zu der sogar Delfine und Stachelrochen gehören.

Wie das Inselmeer der Anavilhanas im Rio Negro bei Manaus dürfte das riesige Feuchtgebiet ausgesehen haben, das nach neuen Befunden vor 16 bis 10 Millionen Jahren große Teile von Amazonien einnahm.

CORBIS, RICARDO AZOURY

Von Carina Hoorn

Der Blick aus dem Flugzeug macht es deutlich: Auch abseits des Amazonas prägen seine Wassermassen die Landschaft. Der mächtigste Fluss der Erde, der nicht weit von der Pazifikküste im Hochland Perus entspringt und nach etwa 6500 Kilometern im Nordosten Brasiliens in den Atlantik mündet, tritt regelmäßig während der Regenzeiten über die Ufer und überschwemmt riesige Waldgebiete. In den zahllosen Seen, von denen die umliegende Auenlandschaft wimmelt, bleibt sein Wasser ganzjährig stehen. Der vielfältigste und größte geschlossene Regenwald der Erde, der mit 2,5 Millionen Quadratkilometern eine Fläche von der Größe Mitteleuropas bedeckt, hängt so gleichsam am Tropf des Amazonas.

Wie lange die enge Beziehung zwischen beiden schon besteht, war bis vor Kurzem noch völlig unklar. Da die heute Amazonien genannte Region nur schwer zugänglich ist, gab es zwar Theorien über die Frühzeit des Flusses und des Regenwalds. Doch ließen sie sich kaum überprüfen und blieben somit zwangsläufig spekulativ.

In den letzten 15 Jahren eröffneten sich neue Möglichkeiten, die Gesteine und Fossilien vor Ort zu untersuchen. Dadurch ließ sich endlich ein vollständigeres Bild von der Geschichte des Amazonas gewinnen. Demnach scheint der Fluss eine langwierige Geburt gehabt zu haben, die sich über Jahrmillionen hinzog. In dieser Frühzeit übte er einen starken Einfluss auf die Evolution der Pflanzen- und Tierwelt in der Region aus. Nach heutigem Verständnis speiste er anfänglich ein Labyrinth miteinander verbundener Seen im Zentrum des Kontinents, bevor er sich einen direkten Weg zum Atlantik bahnte.

In diesem riesigen Feuchtgebiet, das ideale Bedingungen für Lebensformen im Wasser wie an Land bot, konnte sich die Flora und Fauna des Regenwalds viel früher entwickeln als bisher angenommen. Jetzt wird auch klar, warum Tiere wie Delfine oder Rochen, die normalerweise im Ozean zu Hause sind, in den Binnenseen Amazoniens vorkommen.

Aussagekräftige Sedimente

Bis zum Beginn der 1990er Jahre wussten die Geologen nur, dass Verschiebungen riesiger Blöcke der Erdkruste vor etwa 24 bis 5 Millionen Jahren die südamerikanischen Anden aufgetürmt haben. In dieser Epoche, dem Miozän, entstanden auch der Himalaya und die Alpen. Dabei bildeten sich in Europa und Asien neue Flüsse, während andere ihren Lauf änderten. Den Experten war klar, dass Ähnliches auch in Südamerika geschehen sein musste. Doch wie und wann, blieb ein Rätsel.

Als ich mich 1988 diesen Fragen zuwandte, vermutete ich die brauchbarsten Hinweise auf die früheren Umweltbedingungen Amazoniens in den mächtigen Sedimentschichten am Boden des breiten Betts, durch das der Amazonas sich heute Richtung Atlantik wälzt. Allerdings war es schwierig, an diese Ablagerungen heranzukommen. Ein Dschungel, der groß genug ist, um neun Länder zu überspannen, gibt seine Geheimnisse eben nicht so einfach preis. Vor allem treten die Gesteine, zu denen sich die ursprünglichen Ablagerungen von Schlamm, Sand und Pflanzenresten inzwischen verfestigt haben, nur an wenigen Stellen im Amazonasbecken offen zu Tage. Diese Stellen aber liegen meist an fast unzugänglichen Nebenflüssen und sind von dichter Vegetation überwuchert.

Gemeinsam mit einem Geländeassistenten erforschte ich Wasserwege von insgesamt mehreren hundert Kilometern Länge in Kolumbien, Peru und Brasilien. Auf dieser langen Strecke fanden wir nur einige Dutzend größere Stellen, wo Sedimentgestein aufgeschlossen war. Häufig mussten wir eine Machete schwingen, um den Pflanzenbewuchs zu entfernen, wobei wir einmal eine riesige grüne Anakonda über- ▷



Nur selten findet man im Amazonas-Regenwald Stellen wie diese gelb-braunen Klippen am Caquitá-Fluss in Kolumbien, wo tiefere Erdschichten freiliegen und Hinweise auf die Frühzeit der Region geben.

raschten und ein anderes Mal Fußspuren eines Jaguars freilegten. Selbst wenn wir uns auf diese Weise Zugang zu einer Gesteinsformation verschafft hatten, konnten wir nur an die obersten Schichten gelangen. Teilweise sind solche Formationen insgesamt bis zu einen Kilometer dick.

Nach Abschluss der Geländearbeiten stand für mich fest, dass der Amazonas in seiner heutigen Form frühestens vor 16 Millionen Jahren entstanden sein kann – also zu Beginn jener Epoche, die Geologen als Mittleres Miozän bezeichnen. Alle älteren Gesteine, die wir gefunden hatten, bestanden aus rötlichem Ton und weißem Quarzsand – Erosionsprodukten von Granit und anderen hellen Gesteinen, die nur in der Mitte des Kontinents vorkommen. Die früheren Wasserläufe mussten demnach im Zentrum von Amazonien entsprungen sein. Offenbar strömten die Flüsse im Unteren Miozän von niedrigen Gebirgen im Innern des Kontinents in Richtung Nordwesten und mündeten teilweise in die Karibik. Andere Forscher haben diese Schlussfolgerung inzwischen bestätigt.

Doch dann änderte sich die Landschaft Amazoniens radikal. Die Ursache war eine Phase heftiger tektonischer Aktivität, mit der die Auffaltung der nordöstlichen Anden begann. An die Stelle der roten und weißen Sedimente trat nun eine interessante Wechsellagerung aus türkisblauen, grauen und grünen Tonen sowie braunem Sandstein und fossilisiertem Pflanzenmaterial (Lignit).

Die dunklen Schlamm- und Sandpartikel konnten schwerlich von hellfarbenem Granit stammen. Charakteristische Schichtungsmuster in den verfestigten Sedimenten deuteten außerdem darauf hin, dass das Wasser damals nicht mehr nach Norden, sondern nach Osten strömte. Offenbar hatte – so der nahe liegende Schluss – das sich hebende Gebirge im Nordwesten das Drainagemuster so verändert, dass die Flüsse nun in den Atlantik entwässerten.

Eine spätere Analyse der Ablagerungen durch Forscher an der Universität Wageningen (Niederlande) bestätigte diese Vermutung. Demnach waren viele der braunen Sandkörner tatsächlich Bruchstücke der dunklen Schiefer und anderer Gesteine, die im Verlauf der Hebung des jungen Andengebirges abgetragen wurden. Außerdem stammten einige der Pollenkörner und Sporen, die ich in den Tonen und Ligniten gefunden hatte, von Nadelbäumen und Baumfarnen, wie sie nur in den höheren Lagen eines Gebirges wachsen. Dagegen gehörten die Pollen in den Sedimenten des Unteren Miozäns zu Pflanzen, die ausschließlich im Tiefland im Zentrum des Kontinents vorkommen.

Zu guter Letzt untermauerte auch ein Gesteinsaufschluss in Brasilien, der als einziger den Übergang von den rötlichen Tonen zu den blauen und braunen Sedimenten lückenlos dokumentierte, die von mir gezogenen Schlüsse. Damit ließ sich die Geburtsstunde des angehenden Amazonas endlich exakt angeben: Sie schlug vor 16 Millionen Jahren.

Wie bald deutlich wurde, erreichte der Fluss allerdings erst viel später seine heutigen imposanten Ausmaße. 1997 entdeckten David Dobson von der Universität von Michigan in Ann Arbor und seine Kollegen, dass sich Sandkörner aus den Anden, wie ich sie in Amazonien gefunden hatte, an der brasilianischen Küste erst vor etwa 10 Millionen Jahren abzulagern begannen. Der Strom benötigte also mindestens sechs Millionen Jahre, um sich zu dem komplett vernetzten, transkontinentalen Entwässerungssystem zu entwickeln, das er jetzt darstellt. Analysen der geologischen Veränderungen in dieser Übergangsperiode haben entscheidend dazu beigetragen, die Ursprünge der teils rätselhaften heutigen Tierwelt in der Region aufzuklären.

Flachmeer oder Seenlabyrinth?

Jahrzehntelang herrschte die Lehrmeinung, fast im gesamten Miozän hätte ein Flachmeer große Teile Amazoniens bedeckt. Auf den ersten Blick scheint die neue Erkenntnis, wonach der Amazonas Jahrmillionen benötigte, sich zum Strom der Ströme auszuwachsen, durchaus vereinbar. Schließlich könnte gut sein, dass ihm das vermutete Flachmeer zunächst den Weg zum Atlantik versperrte. Eine längere Verbindung Amazoniens mit dem Ozean würde auch erklären, wie Delfine, Seekühe, Rochen und andere Meeresbewohner ins Zentrum des Kontinents gelangen konnten. Als sich das Meer dann zurückzog, hätten sie sich an das Süßwasser im Regenwald angepasst. Außerdem konnten Forscher überzeugend belegen, dass im Landesinneren Argentiniens – also weiter südlich – im Miozän wirklich ein Flachmeer existierte.

All das scheint die Geschichte vom Seeweg zu stützen. Doch meine Kollegen und ich haben verschiedene Indizien dafür gefunden, dass eine Verbindung zum Ozean nicht über längere Zeiträume hinweg existieren konnte. Unserer Ansicht nach stammen die von mir entnommenen Gesteinsproben, die zum Mittleren Miozän gehören und den Zeitraum zwischen ungefähr 16 und 10 Millionen Jahren vor heute abdecken, aus einer im Wesentlichen von Süßwasser geprägten Umwelt.

Eines der auffälligsten Merkmale der geologischen Formationen aus dem Mittleren Miozän ist ihre Periodizität. Von Anfang an sah ich darin ein Zeichen da-

IN KÜRZE

- Lange herrschte die Lehrmeinung, dass Amazonien während eines Großteils seiner Existenz **von einem Flachmeer bedeckt** war und seinen heutigen Artenreichtum erst in allerjüngster Zeit erwarb.
- Nach neuen Forschungsergebnissen existierte jedoch schon ein Regenwald, als **vor 16 Millionen Jahren** der Amazonas entstand.
- Nun scheint es, dass die Entwicklung der Region eng mit der **langwierigen, dramatischen Geburt** dieses Stroms verbunden ist, der erst seit etwa 10 Millionen Jahren quer durch Südamerika bis zum Atlantik fließt.

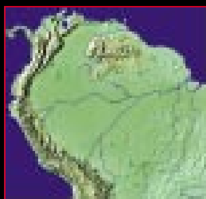
für, dass in trockenen und feuchten Jahreszeiten abwechselnd verschiedenartige Sedimente abgelagert worden waren – ein typisches Merkmal von Feuchtgebieten, die durch kleine Flüsse gespeist werden. Im Verlauf der Trockenphase setzten sich, so meine Deutung, Bodenpartikel und pflanzliches Material langsam am Boden der flachen Seen und Sümpfe ab, wo sie sich schließlich in die blauen Tone und Lignit verwandelten. In der Regenzeit dagegen führten die angeschwollenen Flüsse, die aus dem Bergland im Westen kamen – darunter vielleicht der noch junge Amazonas – die braunen Sande mit. Bezeichnenderweise treten die für die Hochlagen der Anden typischen Minerale nur in den Sandsteinschichten auf.



Doch nicht alle Forscher stimmen meiner Interpretation zu. Nach Meinung von Matti Räsänen und seinen Kollegen an der Universität Turku in Finnland sollen die abwechselnden Sedimenttypen vielmehr das Ansteigen und Absinken des Meeresspiegels im Rhythmus der Gezeiten widerspiegeln. Demnach hätten sich in dem flachen Meer oder Meeresarm, der Amazonien damals angeblich bedeckte, die Küstenlinien jeweils beträchtlich verlagert. Die auflaufende Flut brachte, so die Theorie von Räsänen und Kollegen, die Sande mit. Der Schlamm und das pflanzliche Material setzten sich ab, wenn sich das Meer bei Ebbe zurückzog. Dazu ist allerdings anzumerken, dass sich Gezeitenströme auch in großen Binnenseen bilden können.

Die klarsten Hinweise auf ein Süßwasserregime lieferten Fossilien. Frank P. Wesselingh, der heute am Naturhistorischen Museum in Leiden (Niederlande) tätig ist, begleitete mich 1991 nach Kolumbien und fand in den dortigen Gesteinen des Mittleren Miozäns eine vielfältige Population fossiler Weichtiere. An diesen und anderen Mollusken, die etwa sieben Millionen Jahre Erdgeschichte repräsentierten und aus Dutzenden von Aufschlüssen aus ganz Amazonien stammten, führte er detaillierte taxonomische Analysen durch. Dabei ▷

Ein Seeweg durch Südamerika?



Im Regenwald Amazoniens leben typische Meeresbewohner wie Delfine und Rochen in schlammigen Süßwassertümpeln (Fotos). Ihre Herkunft gibt Rätsel auf. Nach herkömmlicher Sicht soll vor 25 bis 10 Millionen Jahren ein Flachmeer Südamerika von Nord nach Süd durchzogen haben (Karte unten). Die atypischen Süßwasserbewohner würden demnach von Vorfahren abstammen, die im Ozean zu Hause waren und durch diese Seestraße in die Region einwanderten. Als sich das Meer dann zurückzog, hätten sie sich an das Süßwasser angepasst.



Amazonasdelfin *(Inia geoffrensis)*



Süßwasser-Stachelrochen *(Potamotrygon falkneri)*

DELFIN: MINDEN PICTURES, FLIP NICKLIN; ROCHEN: PHOTO RESEARCHERS INC., DANTE FENOLIO; KARTEN: RON MILLER

Amazonien im Wandel der Zeiten

Das riesige Binnenland im Norden Südamerikas, das heute unter dem Namen Amazonien bekannt ist, hat in den letzten 25 Millionen Jahren sein geografisches Erscheinungsbild mindestens dreimal entscheidend verändert (Karten). Langsam setzt sich die Erkenntnis durch, dass die Region während dieses Zeitraums – im Gegensatz zur traditionellen Ansicht – nur gelegentlich kurzeitig von Meerwasser bedeckt war. Demnach strömten von den sich hebenden Anden schon viel früher als bisher gedacht Flüsse Richtung Osten. Der junge Amazonas speiste so Jahrmillionen lang eines der weltweit größten Labyrinthe miteinander verbundener Seen, bevor er sich schließlich einen Weg zum fast 6500 Kilometer entfernten Atlantik bahnte.



vor 25 Millionen Jahren
Zu Beginn des Abschnitts der Erdgeschichte, der Miozän genannt wird, existierten der Amazonas und die nordöstlichen Anden noch nicht. Die wichtigsten Wasserläufe Amazoniens flossen von niedrigen Bergen im Zentrum des Kontinents Richtung Nordwesten, wo sie großenteils in die Karibik mündeten.



vor 15 Millionen Jahren
Die nordöstlichen Anden hatten sich zu etwa einem Viertel ihrer gegenwärtigen Höhe aufgefaltet und so den nach Nordwesten strömenden Flüssen den Weg abgeschnitten. An den Ostflanken des neuen Gebirgszugs regneten feuchte Passatwinde ab und speisten neue Wasserläufe, die nach Osten abflossen. Zu ihnen zählte der Amazonas. Zusammen mit anderen Flüssen ergoss er sich in ein riesiges Feuchtgebiet, das sich allmählich Richtung Osten ausbreitete.



heute
Vor etwa 10 Millionen Jahren brach der Amazonas, vielleicht bedingt durch die weitere tektonische Hebung der Anden, zum Atlantik durch und erreichte seine jetzige Länge. Da der Fluss nun in den Ozean entwässerte, fielen viele von den Seen trocken, die lange das Landschaftsbild Amazoniens bestimmt hatten. Der Amazonas begann Sedimente vor der Küste Brasiliens abzulagern und schuf so einen der größten submarinen Sedimentfächer der Welt.

RON MILLER

▷ konnte er sich auf frühere Untersuchungen von Patrick Nutall stützen, der damals am Britischen Museum in London arbeitete. Wie sich zeigte, waren die meisten Weichtiere an Süßwasser angepasst. Nur ganz wenige Arten hätten in einem vollständig marinen Milieu überleben können. Das spricht klar gegen die Hypothese von Räsänen, dass über längere Zeiträume hinweg eine Verbindung zum Meer existierte. In diesem Fall wären alle Süßwasserarten ausgestorben.

Im Jahr 1998 zogen Hubert B. Vonhof von der Freien Universität Amsterdam und Wesselingh zusammen mit anderen Forschern aus der atomaren Zusammensetzung der Weichtierfossilien denselben Schluss. Muscheln vergrößern ihre Schalen Jahr für Jahr. Dabei bauen sie in die neue Kalkschicht Kohlenstoff, Sauerstoff, Kalzium und andere im Wasser gelöste Elemente ein – darunter auch Strontium, von dem verschiedene Isotope (Atomsorten mit unterschiedlicher Neutronenzahl) existieren. Deren Mengenverhältnis variiert jedoch zwischen Salz- und Süßwasser. Misst man es in den Wachstumsringen einer Muschelschale, erhält man daher Auskunft über den Salzgehalt des Wassers zu Lebzeiten des Weichtiers.

Einwanderung von Meerestieren

Die Strontium-Isotopenverhältnisse in den untersuchten Schalen sprachen klar für Süßwasser. Außerdem erwiesen sie sich als erstaunlich einheitlich, obwohl die Fossilien einen langen Zeitraum und eine große Fläche abdeckten. Die Weichtiere hatten also wahrscheinlich in einem riesigen zusammenhängenden Wasserkörper gelebt, der nach neuesten Schätzungen etwa 1,1 Millionen Quadratkilometer umfasste und damit rund doppelt so groß war wie die Großen Seen in Nordamerika. Zweifellos handelte es sich um eines der ausgedehntesten und dauerhaftesten Seensysteme, die je auf unserem Planeten existierten.

Immer mehr Befunde belegen also, dass Amazonien im Miozän keine länger anhaltende Verbindung zum Meer besaß. Gleichwohl zeigte die Strontium-Signatur der Muschelschalen auch eine gelegentliche Zunahme des Salzgehalts in dem riesigen Seensystem. Bekanntlich lag der Meeresspiegel im Miozän höher als heute. Das ansteigende Karibische Meer könnte somit entlang einer schmalen Inlandspassage Richtung Süden vorgedrungen sein.

Tatsächlich bestätigen Tier- und Pflanzenfossilien, dass vorübergehend eine Verbindung zum Ozean bestand. So fanden sich in meinen Gesteinsproben auch marine Mikroorganismen und die Pollen von Mangroven – Bäumen, die in Salzwasser gedeihen –, allerdings nur selten und über kurze Zeitspannen hinweg. Insgesamt geht aus den fossilen Zeugnissen hervor, dass Amazonien vor 16 bis 10 Millionen Jahren, als das riesige Feuchtgebiet existierte, mindestens zweimal überflutet wurde. Die Meereseinbrüche dauerten nach unseren Schätzungen jeweils nur wenige Jahrtausende.

In dieser relativ kurzen Zeit erreichten die Seen niemals einen so hohen Salzgehalt wie der Ozean. Dennoch hätten Meeresbewohner die Chance gehabt, ins Zentrum Amazoniens vorzudringen. ▷

Abenteuer im Dienst der Wissenschaft

In Amazonien zu forschen ist wahrlich kein Zuckerschlecken. Das bekam ich sehr bald zu spüren, als ich dort 1988 mit meinen wissenschaftlichen Untersuchungen begann. Ich wollte mittels Sedimentgestein, das unter der Vegetation und der dicken Schicht aus verwittertem Boden verborgen liegt, die Entwicklungsgeschichte der Region rekonstruieren.

Wie sich zeigte, tritt der Felsuntergrund in Amazonien nur an wenigen, Hunderte von Kilometern voneinander entfernten Stellen zu Tage. So kam es, dass ich oft wochenlang die unzähligen Nebenflüsse des Amazonas durchstreifte, um die Ränder der von ihnen eingeschnittenen Täler abzusuchen.

Als Basislager diente mir ein ehemaliges Gefängnis in der kolumbianischen Stadt Araracuara. Es war dort errichtet worden, weil man an diesem entlegenen Ort – inzwischen hat er allerdings einen Flughafen – entflohenen Häftlingen keine Überlebenschance gab. In den Urwäldern der Umgebung wäre ich ohne meinen indianischen Geländeassistenten Aníbal Matapi jedenfalls auch verloren gewesen.

So erinnere ich mich lebhaft an einen Tag, als Aníbal und ich stundenlang mit dem Boot auf dem Caquetá in Kolumbien entlangtuckerten. Für mich sah jede Flussbiegung wie die vorherige aus, doch mein Begleiter, der sein ganzes Leben in diesem Teil des Dschungels verbracht hatte, wusste immer genau, wo wir waren.

Schließlich kamen wir so zu einem verlassenen Haus, wo wir unsere Hängematten für die Nacht an der Decke befestigten. Am nächsten Tag würden wir nach Sedimentaufschlüssen an einem anderen Fluss namens Apaporis suchen – in einem Gebiet, das vom Caquetá durch gefährliche Stromschnellen getrennt ist. Das hieß, dass wir unser Boot zurücklassen, den Außenbordmotor schultern und zu Fuß über die Berge durch den Urwald marschieren mussten.


SALOMON B. KROONENBERG

Carina Hoorn (rechts) und ihr Assistent Aníbal Matapi

Nachdem wir so am folgenden Tag zum Apaporis gelangt waren, liehen wir uns von den dort ansässigen Indianern ein kleineres Boot. Eine weitere Indianergruppe gab uns Obdach für die nächsten Tage, während wir nach den heiß ersehnten Gesteinsaufschlüssen suchten. Zunächst waren unsere Gastgeber freundlich, doch plötzlich schienen sie über unsere Anwesenheit nicht mehr sonderlich erfreut zu sein.

Bald wurde klar, warum. Ein weiterer Nichtindianer war eingetroffen – mutmaßlich, um sich zu verstecken. Mitglieder der kolumbianischen Guerilla trieben sich damals in der Region herum, und er dürfte zu ihnen gehört haben. Wir waren erleichtert, endlich abreisen zu können, nachdem wir unser Ziel erreicht und kiloweise schwarzen Ton sowie andere alte Sedimente eingesammelt hatten.

Von allen meinen Reisen war die zum Apaporis die abenteuerlichste. Doch während wir bei Tag verbissen anstehendes Gestein auskundschafteten und abends ermattet in unsere Hängematten sanken, schien es, als sei hier die Zeit stehen geblieben – und als gehöre die hochtechnisierte Welt zu einem Paralleluniversum.

Süß oder salzig?

Proben von 16 bis 10 Millionen Jahre altem Sedimentgestein aus dem Amazonas-Tiefland enthalten – sowohl in ihrer Schichtung als auch in den eingeschlossenen Fossilien – deutliche Hinweise darauf, dass in dieser Region damals nur selten für kurze Zeit salzige Bedingungen herrschten und im allgemeinen Süßwasser dominierte.



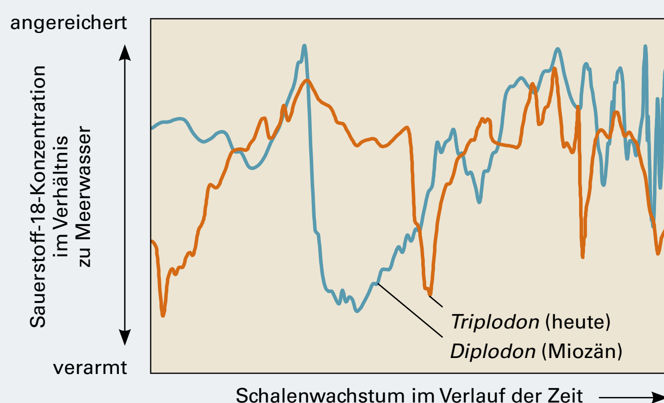


Die meisten Pollenkörner in den Sedimenten stammen von Blütenpflanzen wie Johannisbrotgewächsen (Caesalpiniaceae, links) und Wollbaumgewächsen (Bombacaceae, rechts), die nach heutigem Wissensstand fast ausschließlich an tropischen Flussufern wuchsen. Seltene Vorkommen von Mangrovenpollen und marinen Mikroorganismen in denselben Sedimenten lassen erkennen, dass die Region gelegentlich von Salzwasser überflutet war – aber jeweils nur vorübergehend.





Süßwassermuscheln wie *Pachydon* (links) und *Sioliella* (rechts) überwogen in der Molluskenfauna Amazoniens vor 16 bis 10 Millionen Jahren. Sie wurden an Dutzenden von weit verstreuten Stellen entdeckt. Nur wenige der gefundenen fossilen Arten hätten in Salzwasser überleben können.



Das Sauerstoff-Isotopenverhältnis in 16 Millionen Jahre alten Schalen von Muscheln der Gattung *Diplodon* (rote Kurve) macht deutlich, dass die Tiere in einem flachen See innerhalb eines tropischen Überschwemmungsgebiets lebten. Die Wachstumsringe dieser Schalen bestehen aus Elementen, welche die Mollusken aus dem umgebenden Wasser aufgenommen haben. Das alternierende Muster von Anreicherung und Verarmung an dem seltenen Isotop Sauerstoff-18 gleicht dabei dem, das Muscheln der Gattung *Triplodon* im heutigen Amazonien zeigen. Demnach waren die Tiere einem Wechsel von feuchten und trockenen Jahreszeiten ausgesetzt, wie er typisch für tropische Regenwälder ist. Hätten sie in einem Meeresarm gelebt, sähen die Kurven viel flacher aus.

POLLENKÖRNER: MARTIN KONERT, FREIE UNIV. AMSTERDAM UND CARINA HOORN; MUSCHELN: FRANK P. WESSELINGH, NATURALIS LEIDEN; GRAFIK: JEN CHRISTIANSEN, NACH: RON J.G. KAANDORP, FREIE UNIV. AMSTERDAM; SEDIMENT: MIT FRDL. GEN. VON CARINA HOORN

▷ Genaue Untersuchungen des Werdegangs bestimmter Arten ergaben allerdings, dass die Einwanderung vermutlich schon früher stattfand und die letzte große Verbindung zum offenen Meer wahrscheinlich bereits vor dem Mittleren Miozän abriss – also noch vor der Geburt des Amazonas oder allenfalls kurz danach. Dafür sprechen zum Beispiel Molekularuntersuchungen durch Nathan R. Lovejoy, der inzwischen an der Universität Toronto arbeitet. Demnach wanderten die Süßwasser-Stachelrochen Amazoniens, die eng mit Arten in der heutigen Karibik verwandt sind, schon vor mehr als 16 Millionen Jahren landeinwärts.

Ähnliches gilt für andere ehemalige Meerestiere. So identifizierten Insa Cassens und ihre Kollegen an der Freien Universität Brüssel im Jahr 2000 die rosafarbenen Flussdelfine im heutigen Amazonien als Nachfahren einer Meeresdelfinart, die im frühen Miozän sehr verbreitet war, aber bald danach ausstarb. Diese Säuger dürften also ebenfalls schon vor mehr als 16 Millionen Jahren eingewandert sein.

Ursprung der Artenvielfalt

Eulalia Banguera-Hinestroza von der Universidad del Valle in Cali (Kolumbien) zeigte kürzlich, dass sich zwei Gruppen von Delfinen der Gattung *Inia*, von denen die eine im Amazonas und die andere in Bolivien vorkommt, genetisch deutlich unterscheiden. Demnach müssen sie schon eine beträchtliche Zeit voneinander getrennt leben. Eine solche räumliche Isolation hätte es nicht gegeben, solange ein gemeinsamer Meeresarm die beiden Regionen noch verband.

Die Erkenntnis, dass das Amazonasbecken im Miozän von einem riesigen See statt einem Meer eingenommen wurde, lässt auch die Geschichte des dortigen Regenwalds in neuem Licht erscheinen. Nach einer gängigen Theorie hat sich die Artenvielfalt Amazoniens durch den Wechsel zwischen Eis- und Warmzeiten im Lauf der vergangenen Jahrmillion herausgebildet. Während der Kälteperioden war es im Norden Südamerikas relativ trocken. Ein zunächst vorhandener zusammenhängender Regenwald könnte sich dadurch in einzelne, nicht miteinander verbundene Waldinseln aufgelöst haben.

Nach Meinung vieler Evolutionsbiologen ist eine solche räumliche Trennung die Voraussetzung für das Entstehen biologischer Vielfalt. Wenn kleine Teilbereiche eines einst größeren Lebensraums voneinander abgeschnitten sind, so die Theorie, hören benachbarte Populationen derselben Spezies auf, sich untereinander fortzupflanzen. Dadurch entfernen sie sich genetisch voneinander und bilden



Die periodische Schichtung der Sedimente, die sich inzwischen zu Gestein verfestigt haben, ist typisch für Ablagerungen in flachen, stehenden Gewässern, die sich aus kleineren Flüssen speisen. In regenreichen Jahreszeiten werden von den nun angeschwollenen Strömen mengenweise Sandkörner in die Seen geschwemmt, wo sie sich am Boden ablagern (dünne, hellbraune Schichten). In trockeneren Phasen überwiegen dagegen Schlammpartikel, die sich langsam absetzen und dabei Tonsedimente (blaue Schichten) über dem Sand bilden.

schließlich eigene, neue Arten, die selbst dann noch bestehen bleiben, wenn sich ihre Lebensräume wieder überlappen – etwa weil die Waldinseln in Warmzeiten erneut zusammenwachsen.

Doch auch hier erzählen die neuen Befunde etwas anderes. Dieselben fossilen Zeugnisse, die auf die Existenz des Seen-Ökosystems hinweisen, belegen zugleich, dass viele der heutigen Pflanzen und Tiere in Amazonien schon vor Jahrmillionen dort lebten. So dokumentiert das Spektrum der Pollen, die meine Assistenten aus den miozänen Gesteinen isolierten, eine erstaunlich vielfältige Vegetation. Insgesamt konnte ich 214 Arten identifizieren. Und es wären weit mehr als doppelt so viele gewesen, hätte ich nicht all diejenigen von der Zählung ausgeschlossen, die nur in einer einzigen Probe vorkamen.

Die häufigeren fossilen Pollen stammen großenteils von Blütenpflanzen, die charakteristisch für Flussufer im Regenwald sind, und zeigen eine ähnliche Vielfalt wie ihre heutigen Nachfahren. Bei einer Überflutung der Region mit Salzwasser hätten diese Landpflanzen erst sehr viel später so zahlreich auftreten können. Auch das spricht gegen die Hypothese, Amazonien sei einst für längere Zeit im Meer versunken.

Explosive Evolution

Nicht nur die Pollen bezeugen, dass unter den Klimaverhältnissen im Miozän ein artenreicher Regenwald existieren konnte. Bestätigung kommt auch von einer neuen Untersuchung der Wachstumsringe in etwa 16 Millionen Jahre alten Muschelschalen. Ron J. G. Kaandorp von der Freien Universität Amsterdam interessierte sich für die Isotopenverhältnisse von Sauerstoff, die Rückschlüsse auf die Niederschlagshäufigkeit erlauben. Dabei fand er ein alternierendes Muster, das demjenigen in den Wachstumsringen moderner Mollusken aus Amazonien ähnelt. Bei diesen spiegelt es den Wechsel zwischen feuchten und trockenen Jahreszeiten wider, der typisch für den Amazonas-Regenwald ist. Zwar war es auf der Erde im Miozän wärmer als heute. Dennoch deutet das Auftreten fast identischer Sauerstoff-Isotopenmuster in den fossilen Muscheln darauf hin, dass schon damals klimatische Verhältnisse herrschten, die einem Regenwald-Ökosystem entsprachen.

Im Licht der neuen Hinweise erscheint das miozäne Feuchtgebiet in Amazonien als Brutstätte neuer Arten, in der die Evolution geradezu explosionsartig verlief. Ursache war die Hebung der Anden; denn sie blockierten den alten Abfluss in die Karibik und bildeten zugleich ein neues Quellgebiet für Ströme wie den Amazonas, die sich nun notgedrungen einen Weg nach Osten bahnen mussten. Dabei schufen und speisten sie jenes riesige Labyrinth aus miteinander verbundenen Seen, das Amazonien fast sieben Millionen Jahre lang bedeckte.

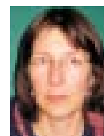
Mehrfach gab es, wie erwähnt, kurzfristige Verbindungen mit dem Ozean, durch die Meeresbewohner in das Feuchtgebiet einwanderten. Diese adaptierten sich schnell an den neuen Lebensraum, der mit seiner verästelten Seenlandschaft eine Fülle für sie günstiger ökologischer Nischen bot. Unter anderem entwickelte sich so innerhalb eines verblüffend kurzen Zeitraums von vielleicht nur wenigen Jahrtausenden eine äußerst vielgestaltige und individuenreiche Molluskenfauna.

Ideale Bedingungen herrschten auch für die Muschelkrebse (Ostracoda). Nach Untersuchungen von Fernando Muñoz-Torres von Ecopetrol, einer kolumbianischen Erdölfirma, fächerten sich diese kleine Krustentiere im selben Zeitraum wie die Mollusken explosionsartig in neue Spezies auf. Dass die flachen Seen und Flussbetten immer wieder zeitweilig voneinander abgeschnitten wurden, dürfte diese rasche Speziation begünstigt haben.

Als dann das Seen-Labyrinth dem voll entwickelten Amazonas wich, starben viele der Mollusken und Muschelkrebse aus, weil sie auf stehende Gewässer angewiesen waren. Dafür eröffnete die sich wandelnde Landschaft reiche Entwicklungschancen für eine breite Palette von Landpflanzen und -tieren.

An den neuen Befunden erstaunt vor allem, wie unverwüstlich Flora und Fauna des Amazonasgebiets zu sein scheinen. Es gibt den Regenwald schon seit 22 Millionen Jahren. In dieser Zeit hat sich das Landschaftsbild gewaltig verändert. Die Anden hoben sich, der Amazonas entstand und Meerwasser drang zeitweise ein. Dem Regenwald machte das nichts: Er wuchs und gedieh. Das ist eine tröstliche Erkenntnis – gibt sie doch Grund zu der Hoffnung, dass Amazonien vielleicht auch die heutigen Eingriffe des Menschen überstehen wird. ◁

AUTORIN UND LITERATURHINWEISE



Carina Hoorn ist Geologin und Pollenexpertin am Institut für Biodiversität und Ökosystemdynamik der Universität Amsterdam, wo sie 1994 promovierte. 2004 folgte ein Mastergrad in Wissenschaftlicher Kommunikation am Imperial College in London. Flüsse erforscht sie, um den Einfluss dieser durch Sedimentation geprägten Lebensräume auf die örtliche Vegetation zu ergründen. Außerdem erstellt Hoorn Gutachten für die Firma Shell in Rijswijk (Niederlande) über neue Prospektions- und Fördermethoden für Erdöl und Erdgas.

New contributions on neogene geography and depositional environments in Amazonia. Von C. Hoorn und H. B. Vonhof (Hg.). Journal of South American Earth Science, Bd. 21, Nr. 1-2, 2006

Seasonal Amazonian rainfall variation in the Miocene climate optimum. Von Ron J. G. Kaandorp et al. in: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Bd. 221, Nr. 1-2, S. 1, 2005

Origin and evolution of tropical rain forests. Von Robert J. Morley. John Wiley & Sons, 2000

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Ideenschmiede für das Jahr 2020

Im bundesweiten Projekt »Jugend denkt Zukunft« spielen Jugendliche in Unternehmen Produktentwickler und Marketingstrategen – wie kürzlich bei der BASF im Bereich Papier und Verpackung.

Von Stefanie Reinberger

Verpackungsmaterialien – für Schüler ein ödes Thema? Die jungen Menschen, die auf der »Zukunftsmesse 2020« einem staunenden Publikum neueste Produkte und Trends in Sachen Karton und Papier präsentieren, wirken gar nicht gelangweilt, sondern höchst engagiert, ja begeistert von ihren eigenen Ideen. Sie reden von Lotuseffekten, die Wasser und Schmutz abweisende Oberflächen schaffen. Sie preisen neuartige Polymere an, die Verpackungen zugleich haltbarer und schmiegsamer machen. Sie werben sogar für Medikamentenschachteln, denen man sogleich ansieht, ob der Inhalt alt geworden ist: Mit Erreichen des Mindesthaltbarkeitsdatums schlägt die Farbe um.

Vor einer Woche waren die hier vortragenden 28 Businessmänner und -frauen noch ganz normale Zwölftklässler am Werner-Heisenberg-Gymnasium in Bad Dürkheim. Seit fünf Tagen aber versetzen sie sich in die Rolle von Managern, Industrieforschern und Verkaufsspezialisten – und ins Jahr 2020. Als sie am letzten Tag dieses Ausflugs in die Zukunft leitenden Mitarbeitern des gastgebenden Unternehmens ihre visionären Produkte für den Verbraucher von morgen recht selbstsicher vorstellen, erhebt sich unter den fachkundigen Zuhörern so manches Mal ein Raunen.

Die im mehrfachen Sinn packende Veranstaltung fand vom 3. bis 7. Juli bei der BASF AG in Ludwigshafen mit Schülern der Leistungskurse Chemie und Sozialkunde statt. Und sie war nicht die erste ihrer Art. Das Chemieunternehmen trug probeweise schon im Frühjahr 2004 erste Planspiele dieser Art aus. Im September 2004 startete das Projekt »Jugend denkt Zukunft« in der Rhein-Neckar-Region offiziell. Mittlerweile läuft es bundesweit (siehe Kasten S. 98). Jugendliche sollen bei diesen Strategiespielen einen Eindruck davon gewinnen, wie im Wirtschaftsalltag der Weg von der Idee bis zu deren Verwirklichung und der Vermarktung des neuen Produkts verläuft. Es kann in der kurzen Zeit nicht um handfeste Erfindungen, um »große« Wissenschaft, um fertige Konzepte für neue Dienstleistungen gehen. Im Vordergrund steht vielmehr die Erfahrung, was alles erforderlich ist, um eine Vision umzusetzen. »Eine gute Er-



ALLE FOTOS DES ARTIKELS: BASF AG LUDWIGSHAFEN



▼ **Praktische Erfahrungen mit der Papierherstellung kamen nicht zu kurz: Wer etwas Besseres produzieren möchte als eine Art Löschpapier, benötigt eine Menge chemische Kenntnisse.**



findung kann nur zur echten Innovation werden, wenn sie auch zum Erfolg führt«, sagt Eckard Hilgemann, Leiter der BASF-Geschäftseinheit Paper Industry Europe.

Ein erklärtes Ziel solcher Planspiele ist aber auch, den Erfindergeist zu fördern und das Interesse an Technologie, wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Innovationen zu wecken. Zugleich sollen die Jugendlichen Betriebsluft schnuppern, Branchen kennen lernen und vor Ort im Austausch mit Angestellten des Unternehmens erfahren, welcher Schritte und Überlegungen es bedarf, um eine Neuheit auf den Markt zu bringen.

Ganz in diesem Sinn begann die Projektwoche bei der BASF damit, gesellschaftliche Megatrends auszuarbeiten. Es galt, die Entwicklung der Bevölkerungsstrukturen zu beobachten und Effekte der Globalisierung zu bewerten. So tasteten sich die Jugendlichen an den Themenkreis heran, wie der Käufer der Zukunft aussehen könnte und welche Ansprüche an Papierverpackungen er in zehn oder zwanzig Jahren vermutlich stellen wird.

Neben all der Theorie kam auch das praktische Arbeiten nicht zu kurz: Der dritte Tag stand ganz im Zeichen der Papier- und Kartonfertigung. Beim Experimentieren im hauseigenen Xplore-Schülerlabor machten die Teilnehmer eigene Erfahrungen damit, wie verschiedene Polymere und Leimungsmittel die Qualität eines Produkts verändern. »Ich hätte nie gedacht, dass im Papier so viel Wissen und Chemie steckt«, gibt die 18-jährige Sarah Guth zu und nennt ein Beispiel: »Ohne Leimungsmittel haben wir regelrechtes Löschpapier erhalten, da kann ja kein Mensch drauf schreiben.« Den Praxistag rundete eine Liveschaltung zur westfälischen Kartonfabrik Cascades Arnsberg GmbH ab, von deren Mitarbeitern sich die jungen Leute Auskunft holen durften. »Interessanterweise waren die Schüler zu diesem Zeitpunkt schon derart in ihrem neuen Element aufge- ▷

▲ Schüler des Werner-Heisenberg-Gymnasiums in Bad Dürkheim durften fünf Tage lang im Zusammenspiel mit der Industrie Zukunftsvisionen entwickeln und im Markt positionieren.

▼ Am Ende war eine professionelle Präsentation gefordert. Um den profimäßigen Auftritt zu unterstreichen, schmückte sich mancher Schüler mit einem Professoren- oder Doktortitel.





▷ gangen, dass sie ganz gezielte Fragen zu Produktions- und Entwicklungsabläufen sowie zu Kooperationspartnern und Zulieferfirmen stellten«, erinnert sich Hilgemann anerkennend.

Mit dem so erarbeiteten Wissenshintergrund folgte der zweite Teil des Planspiels. Die Jugendlichen verteilten sich auf mehrere Mannschaften. Teils vertraten sie fiktive Firmen, die Verpackungsmaterialien herstellen, teils deren Zulieferer, teils ein Marketingunternehmen. Es kam jetzt auf Managementqualitäten an: darauf, zum einen innovative Ideen zu kreieren, zum anderen Strategien zu ersinnen, wie die Neuheiten am besten im Markt zu platzieren seien – und nicht zuletzt darauf, diese Strategien gegenüber den verschiedenen betrieblichen und gesellschaftlichen Interessen überzeugend zu vertreten. Wie im echten Leben erschien nun die Presse, und eine Bürgerinitiative mischte sich ein, die Umweltverträglichkeit, Verbrauchernutzen, Transparenz und dergleichen mehr einforderte. Wie an den ersten Arbeitstagen schon gaben BASF-Mitarbeiter in dieser Phase immer wieder Rückmeldungen und machten auch Verbesserungsvorschläge. Das Ganze mündete in die »Zukunftsmesse 2020«, die Präsentationsveranstaltung am letzten Tag. Ganz im Vokabular der Profis skizzierten die »Jungmanager« ihre Projekte und Ziele.



Unternehmensluft schnuppern

»Der grundsätzliche Ablauf der Planspiele ist immer gleich«, sagt Anette Henrich, die als Mitarbeiterin der Geschäftsstelle »Jugend denkt Zukunft« die Schülergruppe begleitete. »Und doch ist jede Projektwoche immer wieder neu und verschieden – so verschieden eben wie die teilnehmenden Schülergruppen und die Firmen, bei denen das Spiel stattfindet.« Längst haben sich zum Vorreiter BASF bundesweit rund 200 weitere Paten gesellt: Firmen und andere Anbieter, die das Projekt oft, aber nicht zwangsweise, in ihren Räumlichkeiten durchführen. Nicht immer geht es um Themen aus Naturwissenschaft und Technik. Je nach Branche des Gastgebers spielen die Schüler hier eine Produktentwicklung in Wissenschaft und Technik durch, dort fuchsen sie sich ins Bank- und Finanzwesen ein, woanders arbeiten sie bei einer Zeitung oder sie gestalten sogar die Schule der Zukunft. »Und am Ende«, so Henrich, »bin ich jedes Mal aufs Neue erstaunt darüber, wie die Jugendlichen nach nur fünf Tagen beginnen, in den Dimensionen der Unternehmer zu denken und in ihre neuen Rollen zu schlüpfen.«

»Die Woche bei der BASF hat mir viel mehr gebracht als der normale Schulunterricht«, meint Maximilian Wagner. »Da sieht man einfach mal, wie die verschiedenen Bereiche ineinandergreifen und wozu alles gut ist.« Und Andreas Graf, der zusammen mit Maximilian zur Marketinggruppe gehörte, ergänzt: »Vor allem was die Präsentation betrifft, habe ich viel dazugelernt.«

Auch die Chemielehrerin Andrea Wagner zeigte sich mit der Projektwoche äußerst zufrieden. »Außerhalb des normalen Unterrichts arbeiten die Jugendlichen ganz anders und es treten völlig neue Talente hervor«, resümiert sie und bedauert: »Diese Mischung aus Freiheit, praktischem Arbeiten und fächerübergreifendem Denken können wir im normalen Unterricht leider nicht bieten.« Gerade das interdisziplinäre Arbeiten sei enorm wichtig. Daher ist die Lehrerin auch angetan von der Idee, das Projekt gleichzeitig mit Schülern aus den Chemie- und Sozialkunde-Leistungskursen durchzuführen – was auf eine Anregung der BASF-Mitarbeiter zurückging.

Letztlich profitieren von der Projektwoche nicht nur die Schüler, sondern auch die Firmen. »Die Jugendlichen sind in ihrer Denkweise viel offener als wir und haben daher manchmal Ideen, auf die wir nicht gekommen wären«, verrät

Innovationsspiele mit Jugendlichen

Das bundesweite Projekt »Jugend denkt Zukunft« will bei jungen Menschen den Sinn für Innovation, Forschung und strategisches Planen wecken. Das Konzept entwickelte das Institut für Organisationskommunikation (Ifok) in Bensheim auf Initiative der Wirtschaft. Betriebe sind Paten für Schulen vor Ort – von Hauptschulen bis zu Gymnasien. Gemeinsam mit Schülern der oberen Klassen finden über fünf Tage fiktive Planspiele statt, bei denen für die Welt von morgen neue Produkte und Dienstleistungen entstehen. Seit August 2006 ist das Innovationsspiel offizielles Projekt der UN-Dekade »Bildung für nachhaltige Entwicklung«.

Interessierten Schulen und Unternehmen vermittelt Ifok Kontakte. Das Institut organisiert auch den Ablauf der Planspiele und stellt einen Moderator. Träger ist jeweils das durchführende Unternehmen. Weitere Informationen unter www.jugend-denkt-zukunft.de.

◀ **Im firmeneigenen Schülerlabor erprobten die Jungforscher Eigenschaften von Verpackungsmaterialien.**

Hilgemann. Manches Planspiel hat bereits Früchte getragen. So eröffnete die Volksbank Rhein-Neckar eG im Februar dieses Jahres ihre erste Jugendfiliale – gestaltet in Zusammenarbeit mit Neuntklässlern einer Mannheimer Realschule. Und der »Bergsträßer Anzeiger« wurde als Ergebnis einer Projektwoche um eine Jugendredaktion mit eigener Seite bereichert.

»Es ist toll, wenn die Jugendlichen sehen, dass ihr Input gefragt ist und dass es sich lohnt, sich Gedanken zu machen«, merkt Lehrerin Wagner begeistert an. Sie freut sich, dass die Arbeit ihrer Schüler in dem Betrieb nicht einfach verpufft. »Einige der Ideen habe ich mir bereits notiert«, verrät Hilgemann und klopft mit dem Kugelschreiber auf sein Notizbuch. »Die Idee mit dem Indikatorfarbstoff für Medikamentenverpackungen ist absolut genial, darüber müssen wir unbedingt mal genauer nachdenken.« Damit nicht genug. In seiner Rede zum Abschluss des Projekts zieht er für die 28 Jungen und Mädchen noch eine echte Überraschung aus dem Ärmel: Zehn von ihnen werden in diesem Herbst am Workshop »pack.it.2006« teilnehmen. Bei dieser Veranstaltung suchen Mitarbeiter aus verschiedenen Firmenbereichen der BASF, die Werkstoffe für die Verpackungsindustrie herstellen, den Dialog mit Kunden, und gemeinsam macht man sich Gedanken über Trends und Möglichkeiten der Branche. »Wir planen, 80 Jugendliche zu einem Kreativworkshop einzuladen, und wünschen uns, dass ihr auch dabei seid und eure Ideen einbringt«, verkündet Hilgemann. Und dass die Bad Dürkheimer Visionen strategisch geschickt entwickeln und professionell präsentieren können, haben sie ja bereits unter Beweis gestellt. ◁



Stefanie Reinberger ist promovierte Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

AUTORIN

REZENSIONEN

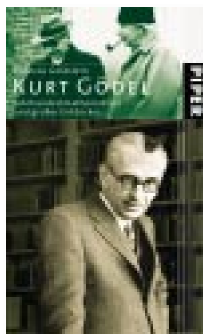
MATHEMATISCHE LOGIK

Rebecca Goldstein

Kurt Gödel

Jahrhundertmathematiker und großer Entdecker

Aus dem Amerikanischen von Thorsten Schmidt.
Piper, München 2006. 312 Seiten, € 19,90



Zu Beginn des 20. Jahrhunderts glaubten die meisten Mathematiker, ihre Wissenschaft lasse sich im Prinzip auf wenige logische Axiome und Ableitungsregeln zurückführen. Wenn diese Grundlegung der Mathematik erst einmal geschaffen sei – woran kaum jemand zweifelte –, würde man ein widerspruchsfreies und vollständiges formales System zur Hand haben, das jeden beliebigen mathematischen Satz in endlich vielen Ableitungsschritten beweisen oder widerlegen könnte. Die Mathematik wäre dann eine Art Beweisautomat, in den man oben eine zu prüfende Formel einwirft und unten nach einigem Rattern und Surren die Auskunft »richtig« oder »falsch« erhält.

Vor hundert Jahren wurde in der damaligen österreichisch-ungarischen Monarchie ein mathematisches Genie geboren, das diese Hoffnung gründlich zerstören sollte. Wie 1931 der junge Kurt Gödel (1906–1978) bewies, enthält jedes formale System, das zumindest eine Theorie der natürlichen Zahlen umfasst, eine unentscheidbare Formel, das heißt eine, die in diesem System weder beweisbar noch widerlegbar ist. Dieser »Gödel'sche Unvollständigkeitssatz« bedeutet, dass die Mathematik kein bloßes Anhängsel der Logik ist und prinzipiell nicht auf ein noch so komplexes Computerprogramm reduziert werden kann; sie bleibt ein offenes, auch in fernster Zukunft nie abgeschlossenes Unternehmen.

Mit seiner überraschenden Entdeckung gebührt Gödel ein Platz unter den größten Geistern der Moderne. Dass er weniger populär wurde als Einstein, mit dem er in späteren Jahren recht eng befreundet war, liegt an der Unzugänglichkeit seiner Resultate, aber auch seiner Person. Erst der Bestseller »Gödel, Escher, Bach« von Douglas R. Hofstadter machte zumindest den Namen und das damit verbundene Problem einer breiteren Öffentlichkeit bekannt: Formale Systeme tragen unweigerlich den Wurm der Selbstbezüglichkeit in sich.



GÖDEL-JUBILÄUM

Karl Sigmund, John Dawson und Kurt Mühlberger

Kurt Gödel – Das Album

Mit einem Geleitwort von Hans Magnus Enzensberger.
Vieweg, Wiesbaden 2006. 225 Seiten, € 29,90

Im Rahmen einer prominent besetzten internationalen Tagung zu Kurt Gödels hundertstem Geburtstag, die im Frühjahr an der Universität Wien stattfand, wurde eine Ausstellung mit Dokumenten zum Leben des großen Logikers eröffnet. Der vorliegende Bildband entstand als Katalog zu dieser liebevoll zusammengestellten Schau, die ab der zweiten Jahreshälfte 2006 durch mehrere europäische Universitätsstädte touren wird.

Nicht nur Gödel-Fans finden hier Interessantes und Einmaliges aus der geistigen Geschichte des 20. Jahrhunderts. Gödels Lebensweg von Brünn über Wien nach Princeton berührte wichtige politische und intellektuelle Brennpunkte, und durch die extrem eigenbrötlerische Haltung des einsamen Genies erscheinen Zwischenkriegszeit, Weltkrieg und Kalter Krieg unter seltsam verfremdetem Blickwinkel. Über die spätere Lebensphase in Princeton, als Gödel aus paranoischer Vergiftungsangst langsam verhungerte (links ein Bild aus dieser Zeit), geben vor allem Tagebucheinträge des Ökonomen und Spieltheoretikers Oskar Morgenstern erschütternd Auskunft.



Viele erstmals gezeigte Faksimiles dokumentieren, wie breit Gödels physikalische, politische und philosophisch-theologische Interessen streuten – mit nicht immer genialen, manchmal skurrilen, in jedem Fall aber originellen Resultaten. Vom Brünner Schulheft mit den ersten Versuchen des Kindes, die Zahlen 1 und 2 zu schreiben, über die Bescheinigung der widerwillig erworbenen Mitgliedschaft in der »Vaterländischen Front« (Bild oben), einer von oben verordneten Einheitspartei in Österreich, bis zur nie abgeschickten Antwort vom 23. April 1957 auf die Bitte des Dichters Enzensberger um ein Gespräch: Die Dokumente wirken rührend und beunruhigend wie leise Rufe aus großer Ferne.


VATERLÄNDISCHE
FRONT
Mitgliedskarte
C-Nr. 228156
Herrn Dr. Kurt Gödel
Beruf: Priv. Dozent Geburtsjahr: 1906
Wohnort: WIEN
VIII. Josefstädterstr. 43
Bezirk: Josefstadt
Beigetreten am: 15.II.1936.

Michael Springer

Der Satz »Dieser Satz ist falsch« sprengt den Rahmen einer automatischen Beweisführung; in solchen »selbstbezüglichen Schleifen« sieht Hofstadter den Grund, warum die Künstliche Intelligenz bisher auf keinen grünen Zweig gekommen ist.

Nun ist pünktlich zu Gödels hundertstem Geburtstag eine Biografie dieses in vieler Hinsicht rätselhaften Mannes erschienen. Rebecca Goldstein liefert eine glänzend geschriebene und souverän organisierte Arbeit. Sie beschreibt Gödels kulturelles Umfeld, stellt seine intellektuelle Leistung sachgerecht dar und schildert aus eigener Anschauung die Stimmung der Gelehrtenhochburg Princeton, in der Gödel seine letzten Lebensjahre verbrachte. Der Versuch, auf knappem Raum Gödels berühmtes Theorem herzuleiten, ist freilich nicht wirklich gelungen. Auch einige unkritisch übernommene Klischees über Wien nach der Jahrhundertwende trüben ein wenig die ansonsten ganz eigenständige Leistung.

Als studierte Philosophin zeichnet Goldstein ein differenziertes Bild des Wiener Kreises, in dem Gödel so unterschiedliche Charaktere wie den logischen Positivisten Rudolf Carnap und den mystischen Denker Ludwig Wittgenstein kennen lernte. Sie betont Gödels Eigenständigkeit in diesem Kreis: Sein Platonismus – der Glaube an die reale Existenz mathematischer Ideen – stand im Widerspruch zum herrschenden formalistischen Standpunkt, wonach die Mathematik eher einem Spiel nach frei gewählten Regeln gleicht.

Rebecca Goldstein schreibt übrigens auch Romane, die im Wissenschaftlermilieu spielen – auf Deutsch erschienen sind »Die Eigenschaften des Lichts. Ein Roman um Liebe, Verrat und Quantenphysik« (2003) und »Die Liebe im logischen Raum« (2002). Das kommt dem Stil ihrer Biografie zugute. Ihr Buch findet damit einen eigenen Platz neben der älteren Gödel-Biografie von John W. Dawson jr., die sich mehr an Fachleute wendet. Wer sich, durch Goldsteins breit ausgreifende Lebensschilderung angeregt, für alle Details von Gödels Leben und Werk interessiert, wird bei Dawson fündig. Wem die fesselnde Darstellung des Genies und seiner Zeit genügt, dem schenkt Rebecca Goldstein ein Leseerlebnis.

Michael Springer

Der Rezensent ist Physiker und ständiger Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft.



ÖKOLOGIE

Josef H. Reichholf

Die Zukunft der Arten

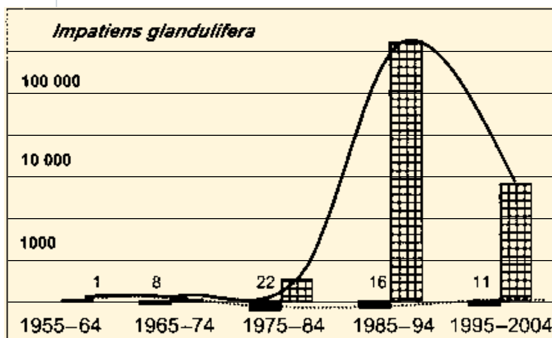
Neue ökologische Überraschungen

C.H.Beck, München 2005. 240 Seiten, € 19,90

Der Naturschutz ist in Erklärungsnot. Trotz intensiver Schutzbemühungen in den letzten drei Jahrzehnten wurden die Roten Listen der gefährdeten Arten immer länger. Nach den aktuellen Ausgaben für Bayern ist etwa die Hälfte aller erfassten Pflanzen- und Tierarten bedroht – mehr als je zuvor. Josef H. Reichholf geht in seinem jüngsten Buch den Ursachen des Artenschwunds auf den Grund und kommt dabei zu überraschenden, oft provokanten Schlussfolgerungen.

Vielfach habe der Naturschutz die Abnahme von Artenvielfalt selbst zu verantworten: durch gut gemeinte Maßnahmen, die ihrem Ziel zuwiderliefen. So das Verbot, Kies-, Sand- und Lehmgruben wild auszuheben, wie es früher zur Gewinnung von Baumaterial gang und gäbe war. Die ständig neu entstehenden Kleingewässer und ihr trocken-warmer Uferbereich waren Refugium für eine Vielzahl von Arten, darunter Eidechsen, Schlangen, Lurche und Insekten.

Oder das strikte Verbot des Kahlschlags. In den selten gewordenen Waldlichtungen entfaltete sich einst ein buntes Leben. Hier krabbelten zahlreiche Ameisenarten und flatterten Auerhühner, für deren Küken die proteinreichen Insekten ein wichtiges Kraftfutter sind.



Das Drüsige Springkraut breitete sich am unteren Inn zunächst rasch aus und nahm dann fast ebenso rasch wieder ab, weil es die Nährstoffvorräte am Standort verbraucht hatte. Schwarze Balken und punktierte Linie: Anzahl der Fundorte. Kästchenbalken und durchgezogene Linie: Anzahl der Exemplare

Der Hauptschuldige für den allgemeinen Artenrückgang sei jedoch die moderne Landwirtschaft, so Reichholf. Die Vereinheitlichung von Strukturen sowie die Überdüngung hätten vielen Organismen den Lebensraum genommen. Wo Hecken und Raine fehlen, sind Feldhase, Fasan und all die anderen Flurbewohner verschwunden.

Reichholf gibt sich nicht mit einfachen Wahrheiten zufrieden. In detektivischer Kleinarbeit geht er den Dingen nach. Stimmt es wirklich, dass der Klimawandel Vögel früher aus ihren Winterquartieren lockt? Für den Kuckuck ist die Antwort eindeutig »Nein«, zumindest was die durch Daten gut dokumentierten letzten fünfzig Jahre anbelangt. Bleibt noch zu klären, warum die Männchen an der Isar etwa drei Wochen später zur Balz rufen als am unteren Inn. Klimatische Unterschiede scheiden aus. Vielmehr liegt der Grund in der zeitlichen Abstimmung auf den jeweiligen Wirtsvogel: Am unteren Inn sind es Rohrsänger, an der Isar hingegen Rotkehlchen, denen das Kuckucksweibchen seine Eier untermogelt.

Eine unvermutete Erklärung liefert der Autor auch für die Wiederansiedlung des Gänsesägers an Isar und Lech in den späten 1960er Jahren. Dies sei nicht dem Schutz vor Verfolgung, sondern dem Bau von Stauseen zu verdanken. Indem sie Schwebstoffe im Oberlauf der beiden Flüsse abfangen, sorgen sie für klare Sicht und schaffen somit die Voraussetzung für eine erfolgreiche Fischjagd. Dagegen verschmähen die Vögel die umfangreichen, eigens für sie eingerichteten Schutzgebiete am unteren Inn, da der Fluss zu ihrer Brutzeit von alpiner Gletschermilch getrübt ist.

Anhand zahlreicher Einzelbeispiele erhält der Leser Einblick in die bunte Welt der Pflanzen und Tiere wie auch in komplexe ökologische Zusammenhänge. Die Landschaft Mitteleuropas ist in höchstem Maße von menschlichem Handeln geprägt und hat sich mit ihm ständig verändert. Das geht, auch heute noch, im Einzelfall zu Gunsten der Artenvielfalt aus. So tummeln sich in Städten mehr Arten als in ihrem Umland, weil sie eine größere Vielfalt an Strukturen zu bieten haben. Manche Tiere finden sich dabei an unvermuteten Orten ein. Wer hätte gedacht, dass die Feldlerche auf den kurz geschorenen Wiesen von Flughäfen, der Bienenfresser in den Lehmwänden von Baugruben brütet? Die zahlreichen Anekdoten machen deutlich, wie vielfältig die Ansprüche an den Lebensraum sind.

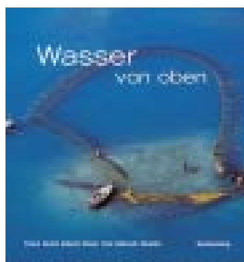
Reichholf, Leiter der Abteilung Wirbeltiere der Zoologischen Staatssammlung, Professor an beiden Münchner Universitäten und Mitglied im Stiftungsrat des World Wildlife Fund (WWF), gilt als einer der führenden Experten Deutschlands in Sachen Naturschutz. Dass er verständlich und lebendig zu schreiben versteht, stellt er auch in seinem jüngsten Buch unter Beweis. Gleichwohl trägt dessen Aufmachung die akademische Handschrift des Autors. So könnten die meisten der 46 Abbildungen direkt den im Anhang zitierten Originalveröffentlichungen entnommen sein – wogegen nichts einzuwenden ist, denn die schlichten Schwarz-Weiß-Grafiken sind eingängig und stützen die Aussagen des Texts.

Störend ist hingegen das Fehlen eines Stichwortverzeichnisses. Wer Orientierung sucht, muss sich mit den Überschriften der zwölf Kapitel begnügen, von denen sich jedes gesondert lesen lässt. Dass sich dadurch Aussagen im Buch wiederholen, ist angesichts der Informationsmenge dem Verständnis durchaus dienlich.

Das einzige echte Manko liegt im Überfluss. Zweifellos lässt sich die Vielfalt der heimischen Natur nicht als »gradlinige Einbahnstraße erschließen«. Aber Reichholf kann es nicht lassen, die überwältigende Fülle seines Wissens vor dem Leser auszubreiten, und verstrickt sich häufig in einen Dschungel von Einzelheiten. Das macht das Lesen unnötig schwer. Das Buch ist bestimmt nicht dazu geeignet, der Natur entfremdete Menschen für den Naturschutz zu gewinnen. Ökologisch Interessierten liefert es aber einen unerschöpflichen Schatz an Informationen und Denkanstößen. Und den in der Szene Engagierten sei wärmstens empfohlen, sich mit Reichholfs Argumenten auseinanderzusetzen.

Achim G. Schneider

Der Rezensent ist promovierter Biologe und freier Wissenschaftsjournalist bei Freiburg.



BILDBAND

Guido Alberto Rossi (Fotos), Gabriele Zanetto (Text)

Wasser von oben

Aus dem Italienischen von Ingrid Ickler und Edmund Jacoby.
Gerstenberg, Hildesheim 2006. 312 Seiten, € 39,90

Wasser ist so eng mit dem menschlichen Leben verknüpft, dass es jede Menge Geschichten darüber zu erzählen gibt. Nicht nur die biblische von der Sintflut und deren unzählige Parallelen aus anderen Kulturen; viele Götter wurden und werden mit dem Wasser identifiziert; Philologen äußern kluge Gedanken über unsere materielle und geistige Beziehung zu dem Stoff, der immerhin den größten Teil unseres Körpergewichts ausmacht.

Und es gibt die immer wieder neu erzählte Geschichte von

- der unschuldigen Natur,
- dem Menschen der Vergangenheit im paradiesischen Einklang mit derselben,
- dem Menschen der Gegenwart, der sich die Natur und insbesondere das Wasser dienstbar macht und
- durch das Übermaß solcher Aktivitäten eine Umweltkatastrophe herbeizuführen droht oder dies schon getan hat.

An dieser Geschichte als Leitfaden haben die Autoren eine Sammlung prachtvoller Luftbilder aufgeknüpft. Und weil die Geschichte zwar irgendwie zutrifft, aber für die aktuelle Diskussion zu wenig konkret ist, haben sie die Handlungsgrundsätze des Stockholmer Wassersymposiums 1998 – 2002 mit abgedruckt. In ihnen geben zahlreiche fachkundige Organisationen den Regierungen der Welt Hausaufgaben auf.

Das ist ebenfalls sicher richtig und aller Ehren wert. Aber es hat mit den Bildern nicht viel zu tun. Ganz offensichtlich hatte der Fotograf nicht die Absicht, das Gewissen der Menschen wachzurütteln, sondern gute Bilder zu machen – was ihm gelungen ist.

Die Gletscherzunge, der Himalayagipfel mit Bergsee, eine Flussschleife des Po in Norditalien oder die wasserumschlungenen Städte New York, Venedig und Amsterdam bieten auch in Rossis Wiedergabe nur den gewohnten Anblick. Die schönsten und überraschendsten Wasserlandschaften hat er auf der philippinischen Insel Luzon gefunden. Und seinem Handwerk getreu gewinnt er auch dem eigentlich Hässlichen und Erschreckenden noch etwas Ästhetisches ab: der Riesenflamme über der Ölbohrplattform, dem ins Wasser abgestürzten Drogenkurierflugzeug, der überschwemmten Stadt New Orleans.

Irgendwie hat das auch der Texter gemerkt und erzählt uns, dass menschengemachte Formen sich den natürlichen angleichen. Dafür findet man in den sorgfältig ausgewählten Bildern in der Tat Belege; na ja.

In seinen besten Bildern widerspricht der Fotograf der Rahmenerzählung. Der rostrote neben dem blauen See (S. 15) sieht aus wie ein besonders krasses Beispiel von Umweltverschmutzung – ist aber natürlich. Der Text geißelt die massenhafte Errichtung von Staudämmen als massiven Eingriff des Menschen in die Natur. Aber der künstliche Lake Powell mitten in der Wüste von Arizona (S. 292 – 293) sieht richtig gut aus.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Salinen im Nildelta: Das Salz wird durch Verdunstung gewonnen.

BIOLOGIE

Christian Göldenboog

Wozu Sex?

Von der Evolution der zwei Geschlechter

Deutsche Verlags-Anstalt, München 2006. 239 Seiten, € 19,90



»Birds – do it; bees – do it; even educated fleas – do it« – und Cole Porter hätte seine Liste endlos fortsetzen können: »Falling in love« oder, weniger romantisch ausgedrückt, Sex ist ein nahezu universelles Phänomen bei mehrzelligen Organismen.

Gerade diese Universalität bereitet Evolutionsbiologen enormes Kopfzerbrechen. Denn Sex ist ein teures Geschäft. Was die Fortpflanzung betrifft, werden männliche Wesen nur benötigt, um die Eier der Weibchen zu befruchten, und ein paar wenige würden für diese Aufgabe genügen. Nun ist aber in den meisten Fällen ein Geschlechterverhältnis von 1 : 1 evolutionär stabil und damit nahezu die Hälfte des Fortpflanzungsaufwands verschenkt.

Weibchen, die sich ungeschlechtlich fortpflanzen und entsprechend nur Weibchen zur Welt bringen, hätten dagegen eine doppelt so hohe Vermehrungsrate und könnten somit ohne Weiteres ihre sich dem Sex hingebenden und Männchen produzierenden Konkurrentinnen verdrängen. Trotz dieses enormen Kostennachteils hat sich die sexuelle Fortpflanzung evolutionär in den meisten Gruppen des Pflanzen- und Tierreichs durchgesetzt. Kaum eine Organismengruppe kommt völlig ohne Sex aus; selbst viele normalerweise asexuelle Lebewesen pflanzen sich unter bestimmten Umweltbedingungen geschlechtlich fort. Und dann gibt es auch noch so etwas wie die Rädertierchen der Klasse Bdelloidea, die sich seit zig Millionen Jahren munter ausschließlich jungfräulich fortpflanzen und sogar 370 Arten ausgebildet haben.

In den vergangenen Jahrzehnten brachten die großen und kleinen Lichter der Evolutionsbiologie mehr als zwanzig Hypothesen in Umlauf, um zu erklären, welche Vorteile die Kosten der geschlechtlichen Fortpflanzung aufwiegen können. Reinigt Sexualität das Genom von schädlichen Mutationen? Oder erlaubt Sex die schnelle genetische Anpassung an eine sich ständig ändernde Umwelt? Keine einzige Vermutung konnte sich bisher als eindeutiger Favorit durchsetzen. Viele Erklärungen klingen durch und durch plausibel, aber sie funktionieren nur, wenn wichtige Parameter wie die Mutationsrate bestimmte Werte annehmen; und Plausibilität ist kein Ersatz für noch ausstehende experimentelle Bestätigungen. George Williams, einer der bedeutendsten Evolutionsbiologen des 20. Jahrhunderts, scheiterte ebenfalls mit seinem Erklärungsversuch – und bemerkte 1975, sein Misserfolg bringe ihn wenigstens in gute Gesellschaft.

Christian Göldenboogs neuester Ausflug in die Evolutionsbiologie fasst die wissenschaftliche Debatte um die Evolution der Sexualität in unterhaltsamer und gut lesbarer Form zusammen. Einige Mitglieder der von Williams identifizierten guten Gesellschaft lernt der Leser samt ihren Denkweisen genauer kennen.

Der 2004 verstorbene John Maynard Smith, dessen 1978 erschienenes Buch »The Evolution of Sex« ein Meilenstein der Debatte ist, stellt zu Beginn des Buchs im Gespräch mit dem Autor die wichtigsten Thesen und Theorien zur Entstehung und Beibehaltung von Sex vor. Von Maynard Smith erfahren wir dann unter anderem mehr über die Theorie der Damenwahl, von Wolf Reik aus Cambridge (England) über die so genannte Prägung des Genoms im Verlauf der Fortpflanzung, von Kim Nasmyth aus Oxford über die molekularen Grundlagen von Eiern und Spermien, und der Populationsgenetiker Luigi Cavalli-Sforza belehrt uns über den Nutzen der durch Sex geförderten genetischen Vielfalt und die wissenschaftlich unhaltbaren Illusionen des Rassismus (Spektrum der Wissenschaft 4/2000, S. 105).

Göldenboog schreibt durchweg kompetent und spannend und lockert die Kapitel mit interessanten historischen Exkursen auf. Leider schließt man das Buch dann doch etwas unzufrieden, denn es fehlen ein roter Faden und ein klares Schlusswort. Göldenboog hätte seinen Lesern zuliebe auch gegenüber Koryphäen wie Maynard Smith oder Cavalli-Sforza häufiger Stellung beziehen sollen, statt sich hinter den meist seitenlangen Abschriften der Interviews zu verbergen.

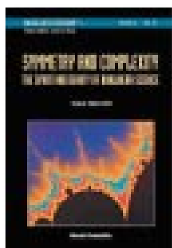
Eine eindeutige Antwort auf die Titelfrage »Wozu Sex?« gibt es zwar immer noch nicht – die Empirie hinkt der Theorie noch weit hinterher –, aber viele vergleichende und experimentelle Studien versprechen neue Einsichten. So erlaubt es die Genomik, in vielen Organismen die Anhäufung schädlicher Mutationen zuverlässiger als je zuvor zu messen; nur wenn die Werte in ein enges Intervall fallen, kann Sex zur »Reinigung« des Genoms dienen. Und viele Wissenschaftler versuchen verstärkt, im Freiland die Vorteile der sexuellen Fortpflanzung abzuschätzen. Göldenboogs Buch gibt einen nur ungenügenden Einblick in diese Entwicklungen und verharrt thematisch zu sehr im Dunstkreis seiner illustren Gesprächspartner.

Sex dient der Reinigung des Genoms – jedenfalls nach einer der zahlreichen Theorien

Glücklicherweise enthält sich der Autor leichtfertiger Analogisierungen tierischen und menschlichen Sexualverhaltens, doch gelingt es ihm nicht, das sensitive Thema ohne Rückgriff auf Klischees darzustellen. Göldenboog beruft sich ausschließlich auf männliche Autoritäten, und an zu vielen Stellen herrscht der Ton eines akademischen Männerstammtischs. Wie kaum ein anderes Thema ist die Untersuchung von Sexualität auch in den Naturwissenschaften von tief sitzenden kulturellen Klischees und Vorurteilen geprägt. Daher ist es bedauernswert, dass Wissenschaftlerinnen wie Lynn Margulis oder Joan Roughgarden mit ihren umstrittenen, aber diskussionswürdigen Theorien zur Evolution der Sexualität oder zur sexuellen Auslese nicht selbst zu Wort kommen. Wissenschaftliche und kulturelle Deutungsmacht befinden sich eben immer noch fest in männlicher Hand.

Thomas P. Weber

Der Rezensent ist wissenschaftlicher Assistent am Institut für Tierökologie der Universität Lund (Schweden) und Buchautor.



MATHEMATISCHE PHYSIK

Klaus Mainzer

Symmetry and Complexity

The Spirit and Beauty of Nonlinear Science

World Scientific, Singapore 2005. 437 Seiten, £ 51,–

Vieles in dem Buch verstehe ich nicht. Einiges davon sollte ich aber verstehen, weil es meine Spezialgebiete betrifft: Symmetrie und Symmetriebrechung in der Physik, Quantenmechanik, Spezielle Relativitätstheorie und die Theorie der Elementarteilchen. Um zu entscheiden, ob es sich lohnt, durch ein Buch mühevoll in unbekannte Gefilde vorzudringen, habe ich es mir zur Regel gemacht, zunächst nachzusehen, ob das, was ich beurteilen kann, richtig und verständlich dargestellt ist. Je nachdem bin ich bereit zum Weiterlesen – oder auch nicht.

Hier nun ist mein Test durch und durch entmutigend ausgefallen. Den harmonischen Oszillator (S. 84) versteht Klaus Mainzer, Professor für Philosophie in Augsburg, so, dass Physiker ihr Standardsystem nur schwer wiedererkennen können. Die Achtlosigkeit, mit der er mit Gleichungen umgeht, ist erstaunlich: Ein kleines Anhängsel an einem F (S. 114) oder ein Punkt mehr oder weniger über x und y (S. 117) machen einen riesigen Unterschied, und entsprechende Druckfehler dürften manchen Leser ratlos lassen.

Beim Zusammenfügen oder Überarbeiten des Textes sind entscheidende Dinge unter den Tisch gefallen. So bleibt der Absatz über Erhaltungssätze mystisch, weil Mainzer den Impuls p als partielle Ableitung der Lagrange-Funktion L nach der (verallgemeinerten) Geschwindigkeit nicht definiert hat. Oder es kommt die schlicht falsche Behauptung zu Stande, dass durch einen Ferromagneten zur Aufrechterhaltung seiner Ordnung stets Energie und Materie hindurchströmen müsse.

Die eigenwillige Terminologie ist ein zusätzliches Verständnishindernis. Ein krasses Beispiel: Man kann zwar mit etwas Mühe erschließen, was gemeint ist, wenn Mainzer auf S. 119 die Einheiten von Raum und Zeit als »commutative« bezeichnet. Aber warum missbraucht er ein Wort, das in der Physik eine festgelegte, völlig andere Bedeutung hat?

Wichtiger als diese Details sind konzeptionelle Missverständnisse, die beim besten Willen nicht auf triviale Druckfehler, Auslassungen oder Abweichungen der Terminologie zurückzuführen sind. Nur zwei von vielen Beispielen: Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit – so muss man Mainzers »constancy of light« verstehen – ist ohne Zweifel ein Eckstein der Speziellen Relativitätstheorie; aber im Gegensatz zu Mainzers Darstellung ist es nicht bemerkenswert, dass die Lichtgeschwindigkeit nicht von der Geschwindigkeit der Lichtquelle abhängt. Auch die Geschwindigkeit einer Bugwelle im Wasser ist im Wesentlichen unabhängig von der Geschwindigkeit des verursachenden Schiffs. Die klassische Physik scheitert erst an der Tatsache, dass die Geschwindigkeit des Lichts auch von der des Beobachters unabhängig ist.

Mainzer behauptet obendrein, die Eichsymmetrie der Elektrodynamik gelte auch für lokale Veränderungen des elektrischen Felds. Eben nicht! Die lokalen Symmetrietransformationen der Elektrodynamik ändern die Potenziale – aber nur so, dass dabei die elektrischen und magnetischen Felder unverändert bleiben.

Ja, es fällt mir schwer, von Problemen im Detail abzusehen, vor allem wenn sie den intensiven Eindruck erwecken, der Autor stelle das Thema seines Buchs nicht adäquat dar – zumindest was die Physik angeht.

Versuchen wir es trotzdem. Das Buch liefert in acht Kapiteln einen umfassenden Überblick über die Bedeutung von Symmetrie, Symmetriebrechung und Komplexität für das naturwissenschaftliche Weltbild, welcher auch die Resultate menschlicher Aktivitäten wie Kunst und Gesellschaft einbezieht. »The message of this book«, heißt es am Anfang des achten Kapitels, »is easy to understand: cosmic evolution leads from symmetry to complexity by symmetry breaking and phase transitions.« Von diesem hohen Gipfel der Erkenntnis aus gesehen, müssen die Mühen der Ebene und des Anstiegs unbedeutend und trivial erscheinen.

Henning Genz

Der Rezensent ist pensionierter Professor für theoretische Physik an der Universität Karlsruhe. Sein Arbeitsgebiet ist die Theorie der Elementarteilchen.

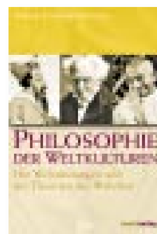
PHILOSOPHIE

Anton Grabner-Haider

Philosophie der Weltkulturen

Die Weltdeutungen und die Theorien der Wahrheit

Marix, Wiesbaden 2006. 472 Seiten, € 14,95



Der Wortbedeutung nach meint Philosophie die Liebe zur Weisheit ohne jegliche Einschränkung auf bestimmte Koryphäen, Schulen oder Kulturen. Doch hegt die Zunft nach wie vor eine eurozentristische Sicht, womit sie leichtfertig die immensen Chancen eines interkulturellen Dialogs verspielt. Einst korrigierten die Naturwissenschaften das stolze geozentrische Weltbild, heute ist es für die Wissenschaften des Geistes höchste Zeit, die tradierte Fokussierung über Bord zu werfen.

Dieses Ziel verfolgen die sieben Autoren des vorliegenden Buchs, sämtlich Fachspezialisten, die jedoch ein breites Publikum ansprechen wollen. Jeder Autor referiert über sein Spezialgebiet wie Afrika, Lateinamerika oder den Islam. Die Mainzer Indologin Heike Michael-Murmann widmet neben der indischen auch der buddhistischen Philosophie ein Kapitel. Allein Anton Grabner-Haider, Religionsphilosoph aus Graz, sprengt den Rahmen. Er schreibt über interkulturelle, chinesische, japanische, jüdische, europäische und nordamerikanische Philosophie.

Alle Kapitel offenbaren, wie sehr sich die Fragen, aber auch die Antworten in verschiedenen Kulturen gleichen. Ein gutes Beispiel ist Michael-Murmanns Text über Indien. So verfasste Jaimini bereits um 300 bis 200 v. Chr. den »Leitfaden der Erörterung (des Werkdienstes)«, das Karma-Mīmāmsā-sūtra, das jahrhundertelange Nachwirkungen hat- ▷

NACHGEHAKT

Mathematiker sind eigentlich ganz normal. Auch Perelman

Der Internationale Mathematikerkongress, der im August in Madrid stattfand, war ein beispielloser PR-Erfolg, aus zwei Gründen: Erstens gibt sich der spanische König die Ehre, mit dem Effekt, dass seine ständigen Begleiter, die Fernsehkameras, auch etwas Mathematik in die Öffentlichkeit tragen. Und zweitens spricht alle Welt darüber, dass Perelman die Annahme der Fields-Medaille verweigert!

Es ist eine Geschichte wie aus dem Bilderbuch: Genial und verrückt ist fast dasselbe. Georg Cantor entwickelte die Mengenlehre mitsamt den Paradoxien, die ihn selbst ebenso verstörten wie uns heute; kein Wunder, dass er in seinem späteren Leben unter schwersten Depressionen litt. Kurt Gödel, der bewies, dass unser Begriff von Wahrheit viel problematischer ist, als die mathematischen Fundamentalisten sich das träumen ließen! Der konnte doch gar nicht anders, als ein krankhaftes Misstrauen zu entwickeln, an dessen Folgen er jämmerlich zu Grunde ging (siehe S. 100).

Und dann dieser Waldschrat namens Grigori Perelman, der die 100 Jahre alte Poincaré'sche Vermutung endgültig erledigt hat (Spektrum der Wissenschaft 9/2004, S. 86). Das ist eine allgemeine Aussage über dreidimensionale Mannigfaltigkeiten. So etwas können wir uns nicht wirklich vorstellen, auch wenn wir selbst in einer solchen leben.

Wer sich den ganzen Tag in derart abstrakten Räumen herumtreibt, muss doch in unserer alltäglichen Welt Orientierungsschwierigkeiten haben. Perelman sieht aus wie ein verspäteter Hippie, pflegt sich die Fingernägel nicht zu schneiden, wird kolportiert (Hand aufs Herz: Wollten Sie das wirklich wissen?); seine Stelle am Steklow-Institut für Mathematik in St. Petersburg hat er aufgegeben; wo er sich aufhält, womit er seine Zeit zubringt und womit er sein Geld verdient, ist nicht bekannt.

Dabei würde die mathematische Welt ihm zu Füßen liegen. Institute in aller Welt hätten sich überboten, ihm die Arbeitsbedingungen seiner Wahl zu verschaffen. Nicht nur den nobelpreisähnlichen Ruhm der Fields-Medaille hat er verschmäht, sondern auch den zugehörigen fünfstelligen Geldbetrag, ganz zu schweigen von der Million, die das Clay-Institut für den Bezwinger der Poincaré-Vermutung bereithält (siehe den Spektrum-Plus-Artikel »Wer wird Millionär?« vom November 2003).

John Ball, der Generalsekretär der International Mathematical Union, hat Perelman besucht, um ihn zur Annahme der Fields-Medaille zu bewegen – vergeblich. Perelman fühle sich der Gemeinschaft der Mathematiker nicht zugehörig und wolle von ihr nicht vereinnahmt werden. Über die Hintergründe zu sprechen fühlt sich John Ball nicht befugt. Nein, die Gemeinschaft der Mathematiker habe ihn nicht zurückgewiesen. Ob um seine geistige Gesundheit zu fürchten sei? Mit Sicherheit nein. Perelman habe ein anderes Wertesystem, als wir es gewohnt sind; »but that keeps life interesting«.

Nichts gegen erhöhtes Interesse an der Mathematik. Aber die geläufige Verbandelung von Genie und Wahnsinn ist einfach Unfug. Die anderen drei Fields-Preisträger dieses Jahres, Andrei Okunkow, Terence Tao und Wendelin Werner, sind nicht durch eine derart klischeegetreue Geschichte aufgefallen; aber ihre ebenfalls grandiosen Leistungen gehen fast unter in dem Rummel um Perelman. Carl Friedrich Gauß (1777 – 1855) und David Hilbert (1862 – 1943), die Großmeister der Mathematik, sind bei klarem Verstand alt geworden. Der lange Zeit älteste Einwohner Österreichs, Leopold Vietoris (1891 – 2002), war Mathematiker und hat seine letzte wissenschaftliche Arbeit mit 104 Jahren veröffentlicht.

Man muss nicht verrückt sein, um sich für eine Fields-Medaille zu qualifizieren. Genialität reicht völlig aus.

Christoph Pöppe

Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft

▷ te. Sein größtes Verdienst ist eine Methodik des wissenschaftlichen Diskurses. Zu Beginn einer Erörterung wird der thematisierte Gegenstand vorgestellt, als nächster Schritt wird ein Zweifel formuliert und im Anschluss eine konträre Ansicht aufgestellt. Auf diese wird in einem vierten Schritt eine Antwort gegeben und das so gewonnene Ergebnis im Kontext weiterer Textstellen interpretiert. Das Schema weist sowohl Parallelen zum aristotelischen Syllogismus als auch zur Dialektik Hegels auf. Der Autorin gelingt ein klar strukturierter Überblick von den Wurzeln der Philosophie in der vedischen Zeit (um 1200 – 600 v. Chr.) über die sechs klassischen Systeme bis hin zur Moderne Indiens.

Diese klare Struktur fehlt leider in anderen Kapiteln. So verliert sich die Darstellung der chinesischen und japanischen Philosophie durch Grabner-Haider in zu vielen Zitaten und Details – Schwächen, die sich durch alle Kapitel des Autors ziehen, aber durch die inhaltliche Stärke aufgewogen werden. Nur bei seiner Darstellung der europäischen Philosophie fallen Lücken auf: Grabner-Haider streift nur kurz die Ideenlehre Platons, der aristotelische Syllogismus bleibt ebenso ungenannt wie die durchaus problematischen Implikationen des Utilitarismus. Stattdessen betont er stets die Stellung der einzelnen Philosophen zum Thema Religion und Gott. Nietzsche verkürzt er auf einen Vordenker der Diktatur.

Umso gelungener beschreibt Reinhard Esterbauer, Professor für Philosophie an der Universität Graz, das Christentum. Frei von Dogmatismus diskutiert er die Wirkung von Aristoteles oder die Relevanz der wichtigsten Gottesbeweise. Anhand des Beispiels Augustinus von Hippo skizziert er den Einfluss der christlichen Weltanschauung auf ein neues, lineares Verständnis von Geschichte und Philosophie. Esterbauers Kollege Karl Prenner aus der katholisch-theologischen Fakultät zeigt, wie stark frühe islamische Denker wie al-Farabi, Ibn Sina oder Ibn Ruschd von der hellenistischen Kultur beeinflusst waren. So debattierten und tradierten sie stoische, kynische, platonische und neuplatonische Ansätze.

Chibueze Udeani, der an der Universität Salzburg Interkulturelle Theologie lehrt, plädiert in seinem Kapitel für eine ▷

▷ *philosophia perennis*, eine ewige Philosophie, als Basis einer interkulturellen Kommunikation. Er skizziert die Debatte um eine oder mehrere afrikanische Philosophien. Während einige Autoren die Ermangelung einer schriftlichen Systematik beklagen, wendet sich zum Beispiel der kenianische Philosoph Oruko gegen eine solche Klassifizierung. Bedauerlich ist, dass die Debatte auf gerade einmal elf Seiten nur angerissen wird, von der afrikanischen Philosophie selbst ganz zu schweigen. Auch Lateinamerika bekommt nur dreißig Seiten eingeräumt. Die beiden Autoren streifen kurz die Erkenntnisse der Maya und Inka, um dann auf die »verpflanzte Philosophie« der Kolonialmacht einzugehen. Im Wesentlichen beschränken sie sich auf die Beschreibung der Genese einer lateinamerikanischen politischen Philosophie.

Den strukturellen Mängeln zum Trotz birgt das Buch einige Schätze. Um diese zu heben, braucht es aber stellenweise ein gehöriges Maß an Vorwissen. Zudem hat der Herausgeber mit der Gewichtung der Inhalte den gleichen Fehler begangen, den er beklagt: 380 Seiten widmen sich der europäischen und asiatischen, lediglich 70 der amerikanischen und afrikanischen Philosophie. Dennoch bietet das Buch eine gelungene und unterhaltsame Übersicht und erweitert den Horizont.

Stefan Keilmann

Der Rezensent hat Germanistik und Philosophie studiert und lebt als freier Wissenschaftsjournalist in Ludwigshafen.

PREISRÄTSEL

Wer zuletzt lacht ...

Finale im Zweikampf der Glücksspieler Hans und Franz in der Disziplin Münzwurf. Hans wettet auf »Wappen«, Franz auf »Zahl«. Beide starten mit dem gleichen Kapital, einem ganzzahligen Eurobetrag. Gespielt wird nach folgender Regel:

Der Verlierer eines Wurfs gibt die Hälfte seines Kapitals an den Gewinner ab. Das Spiel endet, wenn der nächste Verlust nicht mehr in ganzen Cent bezahlt werden könnte.

1. Wurf, 2. Wurf, … gebannt starren beide auf die tanzende Münze. Die Zeit vergeht, die Spannung steigt, jeder hat schon mehrere Würfe gewonnen. Atemlose Stille, denn jetzt, der wichtigste, der letzte Wurf und … Hans gewinnt ihn! Meister im Münzwurf, und um 72,25 Euro reicher als zu Spielbeginn.

Welches waren die Würfe, die Hans schon vor dem letzten Wurf gewann?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Bildbände »Wunder des Weltalls«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, den 17. 10. 2006, eingehen.

Lösung zu »Geburtsdatum« (August 2006)

Der Astronom ist am 13. Februar 1699 geboren, und zwar in einem Land, in dem damals bereits der gregorianische Kalender gültig war.

Zunächst scheidet ein Schaltjahr als Geburtsjahr aus: In einem Schaltjahr kann zwar dreimal »Freitag, der 13.« auftreten (und zwar im Januar, April und Juli), aber in einem solchen Jahr gibt es neben dem 13. Mai keinen zweiten Sonntag, der auf den 13. Tag eines Monats fällt. Folglich ist der Astronom im Februar eines Gemeinjahres geboren. Im selben Jahr fielen der 13. März und der 13. November ebenfalls auf einen Freitag, außerdem der 13. September und 13. Dezember auf einen Sonntag.

Ein festes Datum verschiebt sich von einem Jahr zum nächsten um einen Wochentag, wenn kein Schalttag (29. Februar) dazwischen liegt, ansonsten um zwei Wochentage. Wenn sich also der Geburtstag von Freitag (im Geburtsjahr) auf Mittwoch (im nächsten Schaltjahr) verschiebt, liegt das Geburtsjahr fünf Jahre vor dem nächsten Schaltjahr, denn das Geburtsjahr selbst war ja kein Schaltjahr.

In der Regel ist jedes vierte Jahr ein Schaltjahr. Ausnahmen gibt es gemäß dem gregorianischen Kalender in Jahren wie 1700, 1800 und 1900, deren Jahreszahlen zwar durch 100, aber nicht durch 400 ohne Rest teilbar sind. (Beim bis 1582 gültigen julianischen Kalender gab es keine solchen Ausnahmen.)

Der fünfte Geburtstag des Astronomen muss also in einem der Jahre 1704, 1804 oder 1904 liegen. In welchem dieser Jahre war nun der 13. Februar ein Mittwoch?

Wir rechnen zurück: Im Jahr 2004 fiel der 13. Februar auf einen Freitag. Von den vorhergehenden 100 Jahren waren 25 Schaltjahre (auch das Jahr 2000 war eines), also ergibt sich eine Verschiebung um sechs Wochentage, denn 125 lässt bei Division durch 7 den Rest 6. Somit war der 13. Februar 1904 ein Samstag.

Rechnen wir nun weitere 100 Jahre zurück, so ergibt sich eine Verschiebung um nur fünf Wochentage, denn in diesem Zeitraum lagen nur 24 Schaltjahre. Im Jahr 1804 war der 13. Februar also ein Montag und im Jahr 1704 schließlich ein Mittwoch. Somit ergibt sich als Geburtsjahr das Jahr 1699.

Dabei haben wir angenommen, dass während der ersten Lebensjahre des Astronomen keine Kalenderreform durchgeführt wurde.

Die Gewinner der drei Einstein-Figuren sind Sarah Riepenhausen, Münster; Alfred Sieglhofer, Vilsbiburg; und Ingo Schiermeyer, Herzogenrath.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unsere Online-Wissenschaftszeitung spektrumdirekt (www.spektrumdirekt.de) bietet Ihnen unter dem Stichwort »Knobelei« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

▷ *philosophia perennis*, eine ewige Philosophie, als Basis einer interkulturellen Kommunikation. Er skizziert die Debatte um eine oder mehrere afrikanische Philosophien. Während einige Autoren die Ermangelung einer schriftlichen Systematik beklagen, wendet sich zum Beispiel der kenianische Philosoph Oruko gegen eine solche Klassifizierung. Bedauerlich ist, dass die Debatte auf gerade einmal elf Seiten nur angerissen wird, von der afrikanischen Philosophie selbst ganz zu schweigen. Auch Lateinamerika bekommt nur dreißig Seiten eingeräumt. Die beiden Autoren streifen kurz die Erkenntnisse der Maya und Inka, um dann auf die »verpflanzte Philosophie« der Kolonialmacht einzugehen. Im Wesentlichen beschränken sie sich auf die Beschreibung der Genese einer lateinamerikanischen politischen Philosophie.

Den strukturellen Mängeln zum Trotz birgt das Buch einige Schätze. Um diese zu heben, braucht es aber stellenweise ein gehöriges Maß an Vorwissen. Zudem hat der Herausgeber mit der Gewichtung der Inhalte den gleichen Fehler begangen, den er beklagt: 380 Seiten widmen sich der europäischen und asiatischen, lediglich 70 der amerikanischen und afrikanischen Philosophie. Dennoch bietet das Buch eine gelungene und unterhaltsame Übersicht und erweitert den Horizont.

Stefan Keilmann

Der Rezensent hat Germanistik und Philosophie studiert und lebt als freier Wissenschaftsjournalist in Ludwigshafen.

PREISRÄTSEL

Wer zuletzt lacht ...

Finale im Zweikampf der Glücksspieler Hans und Franz in der Disziplin Münzwurf. Hans wettet auf »Wappen«, Franz auf »Zahl«. Beide starten mit dem gleichen Kapital, einem ganzzahligen Eurobetrag. Gespielt wird nach folgender Regel:

Der Verlierer eines Wurfs gibt die Hälfte seines Kapitals an den Gewinner ab. Das Spiel endet, wenn der nächste Verlust nicht mehr in ganzen Cent bezahlt werden könnte.

1. Wurf, 2. Wurf, … gebannt starren beide auf die tanzende Münze. Die Zeit vergeht, die Spannung steigt, jeder hat schon mehrere Würfe gewonnen. Atemlose Stille, denn jetzt, der wichtigste, der letzte Wurf und … Hans gewinnt ihn! Meister im Münzwurf, und um 72,25 Euro reicher als zu Spielbeginn.

Welches waren die Würfe, die Hans schon vor dem letzten Wurf gewann?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Bildbände »Wunder des Weltalls«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, den 17. 10. 2006, eingehen.

Lösung zu »Geburtsdatum« (August 2006)

Der Astronom ist am 13. Februar 1699 geboren, und zwar in einem Land, in dem damals bereits der gregorianische Kalender gültig war.

Zunächst scheidet ein Schaltjahr als Geburtsjahr aus: In einem Schaltjahr kann zwar dreimal »Freitag, der 13.« auftreten (und zwar im Januar, April und Juli), aber in einem solchen Jahr gibt es neben dem 13. Mai keinen zweiten Sonntag, der auf den 13. Tag eines Monats fällt. Folglich ist der Astronom im Februar eines Gemeinjahres geboren. Im selben Jahr fielen der 13. März und der 13. November ebenfalls auf einen Freitag, außerdem der 13. September und 13. Dezember auf einen Sonntag.

Ein festes Datum verschiebt sich von einem Jahr zum nächsten um einen Wochentag, wenn kein Schalttag (29. Februar) dazwischen liegt, ansonsten um zwei Wochentage. Wenn sich also der Geburtstag von Freitag (im Geburtsjahr) auf Mittwoch (im nächsten Schaltjahr) verschiebt, liegt das Geburtsjahr fünf Jahre vor dem nächsten Schaltjahr, denn das Geburtsjahr selbst war ja kein Schaltjahr.

In der Regel ist jedes vierte Jahr ein Schaltjahr. Ausnahmen gibt es gemäß dem gregorianischen Kalender in Jahren wie 1700, 1800 und 1900, deren Jahreszahlen zwar durch 100, aber nicht durch 400 ohne Rest teilbar sind. (Beim bis 1582 gültigen julianischen Kalender gab es keine solchen Ausnahmen.)

Der fünfte Geburtstag des Astronomen muss also in einem der Jahre 1704, 1804 oder 1904 liegen. In welchem dieser Jahre war nun der 13. Februar ein Mittwoch?

Wir rechnen zurück: Im Jahr 2004 fiel der 13. Februar auf einen Freitag. Von den vorhergehenden 100 Jahren waren 25 Schaltjahre (auch das Jahr 2000 war eines), also ergibt sich eine Verschiebung um sechs Wochentage, denn 125 lässt bei Division durch 7 den Rest 6. Somit war der 13. Februar 1904 ein Samstag.

Rechnen wir nun weitere 100 Jahre zurück, so ergibt sich eine Verschiebung um nur fünf Wochentage, denn in diesem Zeitraum lagen nur 24 Schaltjahre. Im Jahr 1804 war der 13. Februar also ein Montag und im Jahr 1704 schließlich ein Mittwoch. Somit ergibt sich als Geburtsjahr das Jahr 1699.

Dabei haben wir angenommen, dass während der ersten Lebensjahre des Astronomen keine Kalenderreform durchgeführt wurde.

Die Gewinner der drei Einstein-Figuren sind Sarah Riepenhausen, Münster; Alfred Sieglhofer, Vilsbiburg; und Ingo Schiermeyer, Herzogenrath.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unsere Online-Wissenschaftszeitung spektrumdirekt (www.spektrumdirekt.de) bietet Ihnen unter dem Stichwort »Knobelei« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.



ANDREAS RZADKOWSKI / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Trojaner am Himmel

Große Planeten bieten auf ihrer Umlaufbahn komfortable Plätze für kleine Begleiter. Derartige »Mitläufer« von Jupiter werden nach Streitern aus dem Trojanischen Krieg benannt.

Von Norbert Treitz

Auf den ersten Blick macht ein Planetensystem einen sehr geordneten Eindruck: Planet und Sonne umrunden den gemeinsamen Schwerpunkt auf Keplers Bahnen, und Isaac Newton hat nicht nur das Gravitationsgesetz gefunden, sondern auch nachgewiesen, dass daraus die elliptische Form der Bahnen folgt – zumindest wenn zwei Objekte ganz allein auf der Welt sind. Aber bereits mit einem dritten Körper hört die Idylle auf, und Chaos droht auszubrechen.

Wenn die dritte Masse sehr klein gegen die beiden anderen ist, kann man ihre Bewegungen noch näherungsweise berechnen. Das ist Carl Friedrich Gauß (1777–1855) mit dem Kleinplaneten Ceres gelungen. Kaum dass dieser am 1. Tag des 19. Jahrhunderts von Giuseppe Piazzi entdeckt war, verschwand er noch im selben Jahr (also 1801) hinter der Sonne und war erst einmal nicht mehr aufzufinden. Gauß konnte zur Freude aller Astronomen rechnerisch vorhersagen, wo der Planet wieder zu finden sein würde. Das mathematische Instrument dafür ist als Störungsrechnung bekannt geworden.

Darüber hinaus gibt es Inseln des exakt Berechenbaren im Meer des Chaos. Schon 1772 hatte Joseph Louis Lagrange (1736–1813, in Turin geboren als Giuseppe Luigi Lagrangia) exakt lösbare Sonderfälle für das so widerspenstige Dreikörperproblem gefunden. Wenn zwei schwere Punktmassen (zum Beispiel ein großer Planet M_2 und sein Stern M_1) auf Kreisen um ihren gemeinsamen Schwerpunkt laufen, gibt es fünf Punkte in der gemeinsamen Bahnebene, auf denen ein leichtes Objekt, das heißt eines,

Schwerkraft und Zweikörperproblem

Die Schwerkraft zwischen zwei Punktmassen m und M im Abstand r ist $F_g = mMG/r^2$, mit der universellen Konstanten G. Für eine Kreisbahn mit Radius r und Winkelgeschwindigkeit ω braucht ein Objekt einer Masse m in einem Inertialsystem die Zentripetalkraft $F_{zp} = m r \omega^2$, die also bei festem ω proportional zu r ist.

Laufen zwei Objekte mit Massen m und M auf Kreisen um ihren gemeinsamen Schwerpunkt, so verhalten sich deren Bahnradien r und R umgekehrt proportional, also wie $M:m$. Für die Winkelgeschwindigkeit folgt $(r+R)^3\omega^2 = G(M+m)$. Im Grenzfall m klein gegen M, also auch r klein gegen R ist dies das von Kepler 1619 beschriebene (»dritte«) Gesetz. Das ist für Kreisbahnen leicht zu zeigen, gilt aber auch für Ellipsen mit ihren großen Halbachsen an Stelle der Bahnradien.

Trojanischer Krieg am Himmel: Jupiter trennt die verfeindeten Trojaner (links oben) und Griechen (rechts unten). Nur Patroklos verschläft das Wesentliche, und der hektische Hektor stürmt der schönen Helena hinterher.

Die Objekte in den Lagrange-Punkten L_1 bis L_5 umkreisen die Masse M_1 und laufen im Zeitmittel synchron zur Masse M_2. Natürliche Objekte in den Punkten L_1 und L_2 sind nicht bekannt.

M_1	M_2	L_1	L_2	L_4	L_5
Sonne	Erde	SOHO, ACE	Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)	(Staubwolken)	
	Mars	–	–	1999 UJ_7	Eureka und andere
	Jupiter	–	–	über 900 griech. (Anti-)Trojaner und Hektor	über 600 (echte) Trojaner und Patroclus
	Neptun	–	–	vier namenlose	–
Erde	Mond	–	–	Kordylewski-Wolken	
Saturn	Dione	–	–	Helene	Polydeuces
	Thetys	–	–	Telesto	Calypso

QUELLE: EN.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/LIST_OF_OBJECTS_AT_LAGRANGIAN_POINTS

dessen Anziehungskraft auf die beiden großen vernachlässigbar ist, mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit mitlaufen kann: die Lagrange-Punkte L_1 bis L_5 (siehe Kasten unten). Drei davon (L_1 bis L_3) liegen auf der Geraden, die durch die beiden schweren Punktmassen hindurchgeht, die zwei anderen (L_4 und L_5) spannen mit ihnen jeweils ein gleichseitiges Dreieck auf.

Fantasievolle Autoren denken sich in L_3 des Systems Sonne-Erde eine Gegenerde. Deren Existenz ist nicht leicht zu widerlegen, denn sie wäre von der Erde aus nicht zu sehen.

Die Punkte L_1 und L_2 dieses Systems sind dagegen astronautisch sehr interessant: Man kann dort Satelliten »parken«, die dann – jedenfalls im Zeitmittel – synchron zur Erde um die Sonne laufen. Da die Gleichgewichte bei L_1 bis L_3 nicht stabil sind, ein Objekt aus ihnen also durch geringste externe Einflüsse herausgetrieben würde, muss man die Satelliten »ausbalancieren«, das heißt Störungen ihrer Bahn durch einen – nicht allzu starken – Eigenantrieb entgegenwirken. Sonden in der Nähe von L_1 haben eine konstante Sicht zur Sonne und eine direkte Funkverbindung zur Erde. Dort sind das *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO) und der Satellit ACE stationiert. L_2 bleibt dagegen von der Sonne im wahrsten Sinn des Wortes unbehelligt, er läuft nämlich dauernd im Erdschatten. Die *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP) misst von hier aus die Anisotropie der kosmischen Hintergrundstrahlung. ▷

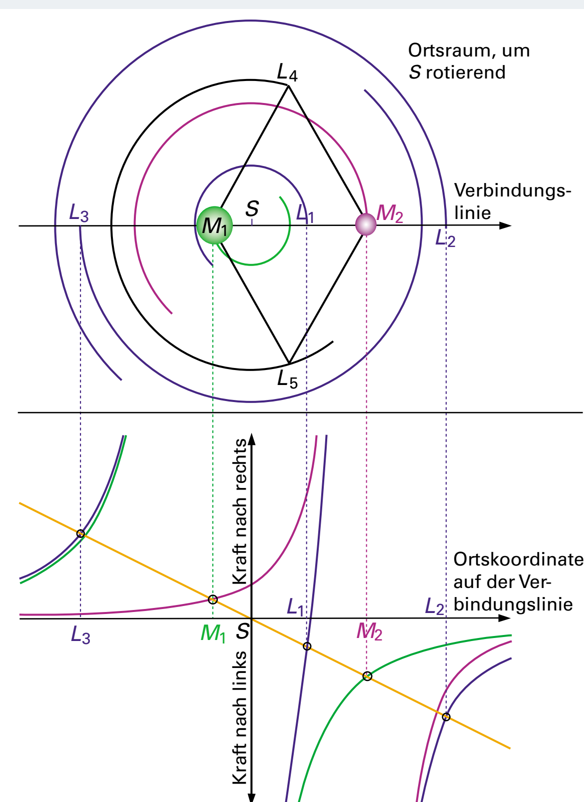
Lagrange-Punkte

Von den fünf Lagrange-Punkten, die zu den Massen M_1 und M_2 gehören (im Bild ist das Massenverhältnis $M_1 : M_2 = 4 : 1$), liegen L_1 bis L_3 auf der Geraden, die durch M_1 und M_2 und deren Schwerpunkt S hindurchgeht.

Ihre Lage kann grafisch bestimmt werden (unten im Bild). Die grüne Kurve gibt die Stärke des von M_1 erzeugten Gravitationsfelds $E_{grav} = M_1\ G/r^2$ an. $m E_{grav}$ ist die Kraft, die M_1 auf eine Probemasse der Größe m im Abstand r ausüben würde; desgleichen die violette Kurve für M_2. Die blaue Kurve ist die durch Addition resultierende Gesamtfeldstärke. In den hier betrachteten Fällen wirken alle Kräfte entlang der waagerecht gezeichneten Verbindungslinie; wir können sie also einfach wie Skalare mit Vorzeichen behandeln und nach oben und unten auftragen.

Die orangefarbene Gerade gibt die Stärke $\omega^2 r$ an, die das Feld haben muss, um ein Objekt im Abstand r und mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit ω wie M_1 und M_2 auf einer Kreisbahn um S zu halten. (»Um der Zentrifugalkraft die Waage zu halten«, schreiben manche Lehrbücher und begeben sich damit auf eine mühsame und entbehrliche Wanderschaft durch verschiedene beschleunigte Bezugssysteme. Zu Scheinkräften siehe auch »Dammis Abenteuer mit Scheinkräften«, Spektrum der Wissenschaft 7/2005, S. 106).

Die Schnittpunkte der orangefarbenen Geraden mit der blauen Kurve geben die drei ersten Lagrange-Punkte an. In manchen Büchern findet man auch eine andere Nummerierung dieser Punkte, mit L_2 in der Mitte.

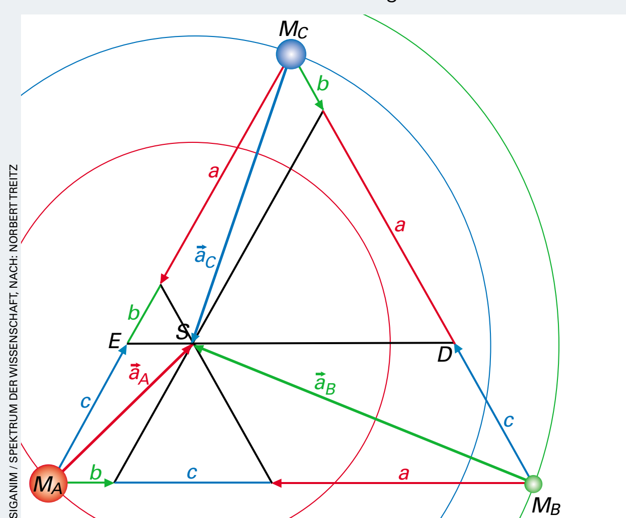


Eine feste Dreiecksbeziehung

Befinden sich drei Massen auf den Ecken *A*, *B* und *C* eines gleichseitigen Dreiecks, so können sie mit gemeinsamer Winkelgeschwindigkeit auf Kreisbahnen um ihren gemeinsamen Schwerpunkt *S* laufen.

Um dies anschaulich zu zeigen, teilen wir die Seiten jeweils im Verhältnis der Massen in die Abschnitte *a*, *b* und *c*, und zwar so, dass jedes Teilstück der zugehörigen Masse gegenüber liegt. Dann verbinden wir die Teilungspunkte und bekommen drei Parallelen zu den Seiten des Dreiecks. Von der so gefundenen Geraden parallel zu M_AM_B beispielsweise haben die Massen M_A und M_B den Abstand $c\sqrt{3}/2$ und M_C den Abstand $(a+b)\sqrt{3}/2$.

Stellen wir uns die drei Massen an den Ecken einer starren, masselosen Dreiecksscheibe befestigt vor. Dann könnte man die ganze Anordnung entlang jeder der drei Geraden »auf Messers Schneide« balancieren. Insbesondere ist ihr gemeinsamer Schnittpunkt der Schwerpunkt aller drei Massen.



Auf M_C wirken nach dem Gravitationsgesetz in Richtung *A* und *B* Beschleunigungen proportional zu M_A beziehungsweise M_B, also auch proportional zu den angrenzenden Teilstrecken *a* beziehungsweise *b*. Entsprechendes gilt für die anderen Massen. Wir können den Maßstab, mit dem wir Beschleunigungen durch Pfeile mit ihren Längen darstellen, so wählen, dass sie so lang sind wie unsere Teilstrecken *a*, *b* und *c*. So sehen wir, dass die auf ein Objekt wirkende Gesamtbeschleunigung seiner Entfernung vom Schwerpunkt proportional ist (Diagonale im Kräfteparallelogramm). Alle drei Objekte können also – bei geeigneten Startbedingungen – mit gemeinsamer Winkelgeschwindigkeit konzentrisch um ihn kreisen, allein unter dem Einfluss dieser Schwerebeschleunigungen, denn die Zentripetalbeschleunigung ist – ganz allgemein – bei fester Winkelgeschwindigkeit proportional zum Radius.

Dabei müssen wir voraussetzen, dass keine Störungen vom Rest der Welt kommen und dass die Parameter des Systems vollkommen exakt sind, denn diese Konstellation ist im Allgemeinen nicht stabil. Gegenüber den Dreiecken aus Sonne, Planet und einem Trojaner ist der hier erklärte Fall allgemeiner, denn die Massen dürfen beliebig sein: im Extremfall auch gleich oder völlig verschieden. Im Lagrange-Fall müssen dagegen die Massen stark abgestuft sein (»größer als 25« zu »1« bis »nahezu null«). Dafür muss aber – sozusagen zum Ausgleich – das leichteste Objekt nicht genau in der Ecke sitzen, sondern kann im mitrotierenden Koordinatensystem um sie herum pendeln.

▷ Die Umgebungen der Lagrange-Punkte L_4 und L_5 sind dagegen für hinreichend große Massenverhältnisse von M_1 und M_2 (größer als etwa 25) stabil in folgendem Sinn: Ein ganz leichtes Objekt kann um sie herumlaufen, mal etwas weiter außen und schneller, mal etwas weiter innen und langsamer, insgesamt auf einer Bahn, die in einem mitrotierenden Koordinatensystem wie der Umriss eines lang gezogenen Nierentischs, einer Bohne oder einer Banane aussieht. Auf solchen Bahnen können passive Objekte wie Kleinplaneten oder Satelliten laufen und wandern auch bei kleinen Störungen nicht auf Nimmerwiedersehen davon. Im einfachsten Fall kann ein Kleinplanet auch genau auf L_4 oder auf L_5 laufen, er bildet dann mit der Sonne M_1 und einem Großplaneten M_2 (zum Beispiel Jupiter) ein starr rotierendes gleichseitiges Dreieck.

Erstaunlicherweise kann man die einschränkenden Bedingungen für die Massenverhältnisse völlig fallen lassen, wenn diese drei Objekte allein auf der Welt sind und »von Anfang an« wie ein starres gleichseitiges Dreieck um ihren gemeinsamen Schwerpunkt laufen. Die Schwerkräfte sind dann nämlich genau die zu den Bahnen passenden Zentripetalkräfte (Kasten oben), und das Dreieck dreht sich starr weiter, wenn es nicht gestört wird.

Trojanischer Friede

Vor 100 Jahren, also 1906, entdeckte Max Wolf einen Kleinplaneten, der im Mittel synchron zu Jupiter läuft, und zwar 60 Grad voraus, das heißt um den L_4 des Sonne-Jupiter-Systems. Er hat den Namen Achilles und die Kleinplaneten-Nummer 588.

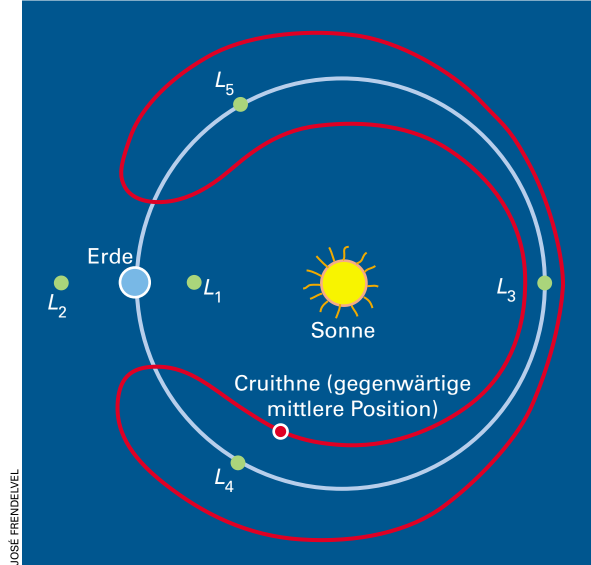
Seitdem sind über 1500 Kleinplaneten bei L_4 und L_5 von Sonne und Jupiter gefunden worden. Sie sind allesamt – sofern sie nicht nur Nummern haben – nach Teilnehmern des Trojanischen Kriegs benannt. Sinnigerweise hat man die beiden Lagrange-Punkte den beiden Kriegsparteien zugeordnet, und zwar den vorauslaufenden Punkt L_4 dem Lager der Griechen oder Danaer und den verfolgenden Punkt L_5 den Trojanern. Da diese Zuordnung jedoch nicht von Anfang an üblich war, finden sich zwei so prominente Kriegsteilnehmer wie der Grieche Patroklos, den die Astronomen mit seinem lateinischen Namen Patroclus (Nummer 61) bezeichnen, und sogar der trojanische Prinz Hektor (624) auf planetarer Ebene unverhofft unter ihren Gegnern wieder.

Als Überbegriff wird die Bezeichnung »Trojaner« nicht nur auf die zahlreichen Kleinplaneten vor und hinter Jupiter angewandt, sondern auf alle Objekte, die einem L_4- oder L_5-Punkt eines Paares aus einem Stern und einem Planeten oder aus einem Planeten und einem seiner Satelliten zuzuordnen sind (Tabelle S. 113).

Auch Mars hat ein Anhängsel, das den schönen Namen »Eureka« (»ich hab's gefunden«) trägt und die Kleinplaneten-Nummer 5261 hat.

Nicht nur jeder Planet hat gemeinsam mit der Sonne seine fünf Lagrange-Punkte, sondern auch jeder Mond mit seinem Heimatplaneten. So sind je zwei kleine Saturn-Satelliten Trojaner von jeweils einem großen (Tabelle S. 113). Kazimierz Kordylewski (1903–1981) fand 1956 im vierten und fünften Punkt von Mond und Erde – also von beiden ungefähr gleich weit entfernt – Staubwolken etwa von der Größe unseres Planeten. Diese sind jedoch extrem schwer zu sehen und möglicherweise auch nur zeitweise wirklich vorhanden.

Vom System Sonne-Erde sind bisher außer ähnlichen Wolken keine echten Trojaner bekannt. Man kennt aber seit wenigen Jahren zwei erdnahe Kleinplaneten, die mit großer Genauigkeit die gleiche Umlaufzeit haben wie wir und uns gerade deswegen nicht gefährlich werden können. Der kleinere hat nur den vorläufigen Namen 2002 AA_{29} (2002 bezeichnet das Entdeckungsjahr). Er ist nur rund 100 Meter groß, und seine Bahn um die Sonne ist noch etwas genauer kreisrund als unsere. In einem mit der Erde um die Sonne mitrotierenden Koordinatensystem steht er aber nicht etwa still. Vielmehr durchläuft er – vereinfacht gesagt – in 190 Jahren eine Bahn, die wie der Umriss eines Hufeisens aussieht und die Lagrange-Punkte L_3 bis L_5 umschließt. Dabei kreist er zeitweise als Quasi-Satellit nahe um die Erde; zu anderen Zeiten steht er ihr fast gegenüber und ist damit weiter von ihr entfernt als Merkur und Venus.



Die mittlere Position von Cruithne läuft von der Erde aus gesehen auf einer hufeisenförmigen Bahn um die Sonne. An den Enden des Hufeisens, in der Nähe der Lagrange-Punkte L_4 und L_5, gleicht die Bahnform einer Niere, ähnelt also der Bewegung der Begleiter Jupiters. Der Punkt L_3 wird lediglich passiert.

Noch verwickelter verhält sich ein mit rund fünf Kilometer Durchmesser deutlich größerer, 1986 entdeckter Kleinplanet mit der Nummer 3753 und dem Namen Cruithne (nach einem sagenhaften König vom keltischen Stamm der Pikten). Er hat eine so exzentrische Bahn, dass er der Sonne näher kommt als Venus und sich weiter von ihr entfernt als Mars. Allerdings kreuzt er deren Bahnen wegen der Neigung seiner Bahnachse nicht wirklich. In dem mit der Erde rotierenden Koordinatensystem ist seine Bahn der Umriss einer sehr großen Bohne, die ihrerseits sehr langsam wandert und deren Mitte in etwa 395 Jahren eine Hufeisenbahn durchläuft (Bild oben). Trotz der komplizierten Bahn haben die Umlaufzeiten von Cruithne und Erde ebenso wie die der Trojaner und Jupiters eine Resonanz von 1:1.

Solche Resonanzen – allgemein: rationale Verhältnisse der Umlaufzeiten mit kleinen Nennern – führen meistens dazu, dass die kleineren Partner aus solchen Bahnen hinausgekegelt werden. In einigen Fällen sind sie auch stabilisierend, wie bei den Trojanern und den beiden genannten Begleitern der Erde, aber auch mit anderen rationalen Zahlen bei dem Kleinplaneten Thule und denen der Hilda-Gruppe. Mehr darüber an dieser Stelle in einem Monat. ◁

AUTOR



Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Seine Vorliebe für erstaunliche und möglichst freihändige Versuche und Basteleien sowie für anschauliche Erklärungen dazu nutzt er nicht nur für die Ausbildung von Physiklehrkräften, sondern auch zur Förderung hoch begabter Kinder und Jugendlicher.

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Kein Verbot von Wunschkindern!

Leihmutterschaft, Eizellspende, Geschlechtswahl – nach welchem Prinzip sollte der Gesetzgeber entscheiden, welche reproduktionsmedizinischen Verfahren zugelassen oder verboten werden sollten?

Von Edgar Dahl

Mädchen zur Rettung seines Bruders gezeugt«, »66-Jährige wird Mutter«, »Gehörloses Paar will taubstummes Kind«. Derartige Schlagzeilen sind nicht nur ein beredtes Zeugnis für das atemberaubende Tempo, mit dem sich die Fortpflanzungsmedizin entwickelt. Sie werfen auch die Frage auf, ob es irgendein konsensfähiges Prinzip gibt, mit dessen Hilfe der Gesetzgeber entscheiden könnte, welche reproduktionsmedizinischen Technologien zugelassen oder verboten werden sollten.

Das einzige Prinzip, das mir mit den Grundsätzen eines freiheitlichen Rechtsstaates wie der Bundesrepublik Deutschland vereinbar zu sein scheint, ist *in dubio pro libertate*, im Zweifel für die Freiheit. Es geht auf zwei der Väter des Liberalismus, auf Wilhelm von Humboldt (1767–1835) und John Stuart Mill (1806–1873), zurück und hat nichts von seinen Vorzügen verloren. Ganz im Gegenteil, seine konsequente Anwendung ist heute nicht nur wünschenswerter, sondern auch unumgänglicher als je zuvor.

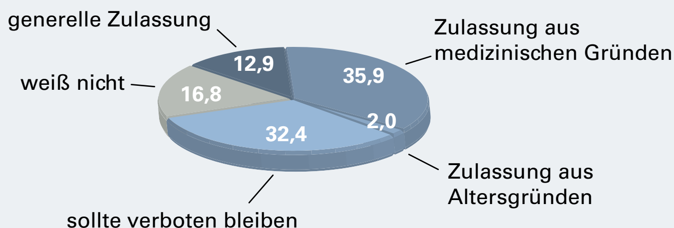
Westliche Gesellschaften sind pluralistische Gesellschaften. Sie bestehen aus Menschen mit unterschiedlichen Weltanschauungen und unterschiedlichen Moralvorstellungen. Dementsprechend wird es unter ihnen stets Uneinigkeit darüber geben, was moralisch richtig und was falsch ist. Wenn ein Staat seinen Bürgern eine ganz bestimmte Form der Moral aufzudrängen versuchte, wären soziale Konflikte unvermeidlich. Um dem vorzubeugen, muss die Politik pluralistischer Gesellschaften auf weltanschaulicher Neutralität, gegenseitiger Toleranz und größtmöglicher Freiheit beruhen: Jeder Bürger sollte das Recht haben, sein Leben so zu leben, wie er es für richtig hält – solange er anderen keinen Schaden zufügt. Der Staat sollte sich in die persönlichen Belange des Einzelnen daher nur einmischen, um seine Bürger vor Schaden durch andere zu bewahren.

Das dem Liberalismus verpflichtete Schadensprinzip hat fünf wichtige Implikationen:

- Die Beweislast hat stets derjenige zu tragen, der sich für ein strafrechtliches Verbot einer bestimmten Handlungsweise ausspricht. Es ist an ihm zu zeigen, dass die zur Debatte stehende Handlung tatsächlich eine Schädigung anderer beinhaltet.
- Die Argumente dafür, dass eine Handlungsweise anderen schadet, müssen einsichtig und überzeugend sein. Sie dürfen nicht auf vollkommen spekulativen soziologischen oder psychologischen Annahmen beruhen.
- Handlungsweisen, die ausschließlich dem Handelnden selbst schaden, dürfen nicht un-

Bei einer repräsentativen Umfrage Ende 2003 in Deutschland wurde eine Eizellspende zumindest aus medizinischen Gründen mehrheitlich befürwortet, etwa 13 Prozent stimmten für eine generelle Freigabe.

Eizellspende



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK; MIT FRDL. GEN. VON: Y. STÖBEL-RICHTER, S. GOLDSCHMIDT UND E. BRÄHLER, UNIVERSITÄT LEIPZIG

Mit welchem Recht darf der Staat einer Frau verbieten, ihrer unfruchtbaren Freundin eine Eizelle (unten) für eine künstliche Befruchtung zu spenden?

AG. FOCUS / SPL, YORGOS NIKAS

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

ter Strafe gestellt werden. Der Staat soll seine Bürger nicht vor sich selbst, sondern nur vor Übergriffen anderer schützen.

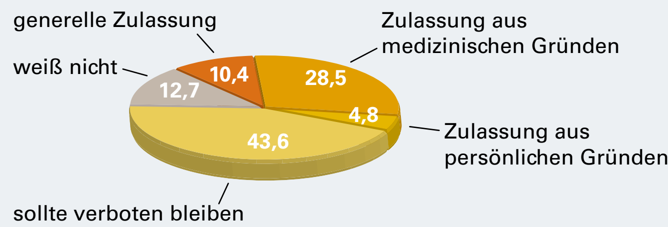
- Dass eine Handlungsweise anderen schadet, ist eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung dafür, sie strafrechtlich zu verbieten. Wenn die Kriminalisierung eines Verhaltens mehr Schaden verursacht als verhindert, widerspricht sie dem Sinn des Schadensprinzips und muss aufgehoben werden.
- Die bloße Tatsache, dass eine Handlung den moralischen Überzeugungen anderer widerspricht, reicht für ein strafrechtliches Verbot nicht aus. In einer pluralistischen Gesellschaft kann die Aufgabe des Staates nicht in der Durchsetzung einer bestimmten Moral bestehen, sondern ausschließlich in der Verhinderung einer Schädigung Dritter.

Moralistische und paternalistische Gesetzgebung

Orientiert man sich am Prinzip *in dubio pro libertate*, dann sind das von der Bundesregierung erlassene Embryonenschutzgesetz und die von der Bundesärztekammer erlassenen standesrechtlichen Richtlinien zur Durchführung der assistierten Reproduktion viel zu restriktiv. In einem freiheitlichen Rechtsstaat kann es keine Rechtfertigung dafür geben, unverheirateten Paaren, alleinstehenden Frauen oder lesbischen Paaren den Zugang zur fortpflanzungsmedizinischen Behandlung zu verweigern und international etablierte Verfahren wie die Eizellspende, die Leihmutterschaft oder die Geschlechtswahl strafrechtlich zu verbieten (siehe Kasten S. 119). Mit welchem Recht maßen wir es uns beispielsweise an, einen Arzt, der den Eltern dreier Söhne zu der lange ersehnten Tochter verhilft, mit einer Gefängnisstrafe von einem Jahr zu bedrohen?

Während das strafrechtliche Verbot der Geschlechtswahl Ausdruck einer moralistischen Gesetzgebung ist, sind die strafrechtlichen Verbote der Eizellspende und der Leihmutterschaft Ausdruck einer paternalistischen Gesetzgebung. Mit welchem Recht, so muss man wieder fragen, darf der Staat es einer Frau untersagen, ihrer Freundin eine Eizelle zu spenden oder ihrer Schwester ein Kind ▷

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK; MIT FRDL. GEN. VON: Y. STÖBEL-RICHTER, S. GOLDSCHMIDT UND E. BRÄHLER, UNIVERSITÄT LEIPZIG



Eine Leihmutterschaft lehnten viele der Befragten ab; ein insgesamt etwa gleich hoher Prozentsatz befürwortete sie aber bei bestimmten Gründen oder generell.

▷ auszutragen? Sicher, sowohl die Eizellspende als auch die Leihmutterschaft sind mit einem gewissen medizinischen Risiko verbunden. Doch in einem freiheitlichen Rechtsstaat kann die Entscheidung darüber, ob eine Frau die mit diesen Eingriffen verbundenen Risiken in Kauf nehmen sollte, nicht beim Gesetzgeber, sondern allein bei der Betroffenen liegen. Es ist schwer einzusehen, dass eine Frau zwar den Ärmelkanal durchschwimmen oder den Mount Everest erklimmen, nicht aber eine Eizelle spenden oder ein Kind für eine andere austragen darf.

Diskriminierung von Paaren ohne Trauschein

Befürworter des Status quo werden vermutlich erwidern, dass die einschlägigen Gesetze ja nicht nur die Frauen vor einer möglichen Ausbeutung ihres Körpers bewahren sollen, sondern vor allem auch dem Schutz des Kindes dienen. Doch wie entwicklungspsychologische Untersuchungen aus Großbritannien gerade gezeigt haben, erfreuen sich die mit Hilfe von Eizellspende und Leihmutterschaft gezeugten Kinder derselben physischen und psychischen Gesundheit wie die auf natürlichem Wege gezeugten Kinder.

Zudem beruhen alle Gesetze, die wir im Namen des Wohlergehens des Kindes erlassen, auf einem offenkundigen Paradoxon: Insofern sie nämlich zur Folge haben, dass diejenigen, die durch sie geschützt werden sollen, gar nicht erst zur Welt kommen, implizieren sie, dass es besser für die Kinder wäre, nie geboren zu werden. Kaum jemand wird bezweifeln, dass es besser für ein Kind ist, wenn es von seinen biologischen Eltern aufgezogen wird – doch wer wollte allen Ernstes behaupten, ohne einen Vater aufwachsen zu müssen oder von zwei Müttern großgezogen zu werden, sei ein derart unzumutbares Schicksal, dass es besser für diese Kinder wäre, nie geboren zu werden?

Von diesem Paradoxon sind selbstverständlich auch die standesrechtlichen Verbote der postmenopausalen und der posthumen Reproduktion betroffen. Es mag zugegebenermaßen alles andere als optimal für ein Kind sein, wenn es von einer 55-jährigen Frau geboren oder mit dem Sperma eines bereits verstorbenen Ehemannes gezeugt wird. Doch es wäre einfach grotesk, wenn man behaupten wollte, dass es besser für diese Kinder wäre, sie hätten nie das Licht der Welt erblickt.

Wem dieser Einwand zu »philosophisch« erscheint, sei an die juristische Debatte um die so genannten Wrongful-Life-Klagen erinnert. Als der französische Revisionsgerichtshof im Jahr 2000 einem gelähmten, tauben, blinden und geistig behinderten Kind eine Entschädigung dafür zusprach, »geboren worden zu sein«, gab es einen derartigen Aufschrei des Entsetzens, dass sich die französische Nationalversammlung genötigt sah, sogleich einen neuen Gesetzentwurf zu verfassen, in dem es explizit hieß, »dass niemandem durch seine Geburt geschadet werden kann«. Wie aber passt die Behauptung, es schade einem Kind, von einem lesbischen Paar großgezogen zu werden, zu der Behauptung, dass man keinem Kind durch seine Geburt schaden könne? Ist unter zwei Müttern aufzuwachsen tatsächlich ein schrecklicheres Schicksal, als gelähmt, taub, blind und geistig behindert zu sein?

Die standesrechtlichen Regelungen zum Schutz des Wohlergehens des Kindes beruhen aber nicht nur auf einem philosophischen Paradoxon, sie führen auch zu einer vollkommen ungerechtfertigten Diskriminierung unfruchtbarer Paare. Indem beispielsweise Paare ohne gültigen Trauschein erst den Segen der zuständigen Ethikkommission einholen müssen, bevor man sie zur reproduktionsmedizinischen Behandlung zulässt, werden sie gewissermaßen doppelt bestraft: Als wäre es nicht schon Strafe genug, unfruchtbar zu sein und sich den Kosten und Mühen einer künstlichen Befruchtung unterziehen zu müssen, werden sie zudem noch einem »Eignungstest« unterworfen, den sich jedes Paar, das auf natürlichem Wege Kinder bekommen kann, mit Recht verbitten würde. Zudem ist es angesichts der wachsenden Zahl allein erziehender Mütter und der gesetzlichen Anerkennung homosexueller Partnerschaften schlichtweg anachronistisch, wenn man alleinstehenden Frauen und lesbischen Paaren länger die Hilfe zur Mutterschaft vorenthalten wollte.

Dass es keine Rechtfertigung dafür gibt, alleinstehende Frauen oder lesbische Paare von der reproduktionsmedizinischen Behandlung auszuschließen, bedeutet selbstverständlich nicht, dass jeder Arzt dazu verpflichtet sein sollte, sie zu behandeln. Wer es nicht mit seinem Gewissen vereinbaren kann, einem lesbischen Paar zu einem Kind zu verhelfen, dem sollte es selbstverständlich freistehen, ihm sei-

ne Hilfe zu verweigern. Wer aber bereit ist, solchen Paaren zu helfen, sollte weder mit strafrechtlichen noch mit standesrechtlichen Sanktionen bedroht werden.

Freiheit hat bekanntlich ihren Preis. Das ist bei der Fortpflanzungsfreiheit nicht anders. Eine unerlässliche Bedingung, die an den ungehinderten Zugang zur reproduktionsmedizinischen Behandlung geknüpft sein sollte, lautet: Für die Kosten muss jeder selbst aufkommen. So wie es nicht angeht, dass Christen, die sich dem Prinzip der Heiligkeit des menschlichen Lebens verpflichtet fühlen, mit ihren Steuergeldern Abtreibungen finanzieren, so sollten jene, die eine Geschlechtswahl als Gottspielen betrachten, auch nicht dafür zahlen, dass sich andere ihren Traum von einer Tochter erfüllen.

Schutz vor Tyrannei der Mehrheit

Wie diese Bemerkungen zum Arztvorbehalt und zur Finanzierung vielleicht deutlich gemacht haben, ist eine moralische und rechtliche Verankerung des Prinzips *in dubio pro libertate* tatsächlich in unser aller Interesse, ganz gleich, ob wir uns nun als konservativ oder progressiv betrachten. Es gibt uns die Freiheit, unser Leben so zu leben, wie wir es für richtig halten, solange wir anderen keinen Schaden zufügen. Und der einzige Preis, den wir hierfür entrichten müssen, besteht darin, es tolerieren zu müssen, dass andere ihr Leben in einer Weise leben mögen, die wir für falsch, unsittlich oder gar gottlos halten, ohne deshalb jedes Mal gleich nach der Polizei rufen zu können. Ich denke, dies ist ein Handel, den niemand ausschlagen kann.

Die Vorzüge des Prinzips werden noch augenfälliger, wenn man die möglichen Alternativen betrachtet. Da wir in einer Demokratie leben, so meinen viele, sollte das Majoritätsprinzip darüber entscheiden, was gesetzlich zugelassen oder verboten wird. Stimmt eine Mehrheit beispielsweise für die Präimplantationsdiagnostik, dann sollte sie erlaubt sein – wenn nicht, sollte sie besser verboten bleiben. Doch so kann nur jemand reden, der nicht weiß, wo er lebt. Wir leben nämlich in einer Demokratie, in der dem Majoritätsprinzip durch die in der Verfassung garantierten Rechte deutliche Grenzen gezogen sind. Allein die Anerkennung individueller und grundgesetzlich geschützter Rechte bewahrt uns sowohl vor einer Diktatur der Regierenden als auch vor einer Tyrannei der Mehrheit. Und so wie eine noch so große Mehrheit eine Minderheit nicht einfach ihres Rechts auf Leben berauben kann, so kann sie diese auch nicht ihres Rechts auf Fortpflanzung berauben. Mit anderen Worten: Selbst wenn 99,9 Prozent unserer Bevölkerung gegen eine Behandlung gleichgeschlechtlicher Paare wäre, könnte das keine Rechtfertigung dafür sein, lesbischen Frauen den Zugang zur Reproduktionsmedizin zu verwehren.

Sollten vielleicht Ethikkommissionen über die gesetzliche Zulässigkeit reproduktionsmedizinischer Technologien entscheiden? Bedauerlicherweise beschäftigen sich solche Gremien zumeist mit der falschen Frage. In aller ▷

Reproduktionsmedizinische Verfahren

▶ **Die In-vitro-Fertilisation (IVF)** kommt für Paare in Frage, die auf natürlichem Wege keine eigenen Kinder bekommen können. Bei der IVF werden der Frau mehrere Eizellen entnommen und in einem Petrischälchen mit den Samenzellen des Mannes befruchtet. Die auf diese Weise entstehenden Embryonen werden dann in die Gebärmutter der Frau übertragen.

▶ **Die Eizellspende** kommt für Frauen in Frage, die nach einer Eierstockoperation keine eigenen Eizellen mehr produzieren können. Dank gespendeter Eizellen, die im Rahmen einer IVF mit den Spermien des Ehemannes befruchtet werden, können solche Frauen ein Kind bekommen, das dann zumindest mit dem Partner genetisch verwandt ist.

▶ **Die Leihmutterschaft** kommt für Frauen in Frage, die mehrere Fehlgeburten erlitten haben und offenbar keine Kinder austragen können. Die im Rahmen der IVF gezeugten Embryonen werden hierzu auf eine andere Frau übertragen, die sie austrägt. Nach der Geburt werden die Kinder dann der genetischen Mutter übergeben.

▶ **Die Präimplantationsdiagnostik (PID)** kommt für Paare in Frage, die Träger einer schweren Erbkrankheit sind und gerne sicherstellen möchten, dass sie ihre Erkrankung nicht an ihre Kinder weitergeben. Hierzu werden den im Rahmen der IVF erzeugten Embryonen ein oder zwei Zellen entnommen und genetisch untersucht. Anschließend werden der Frau nur diejenigen Embryonen in die Gebärmutter übertragen, die frei von der Erkrankung sind.

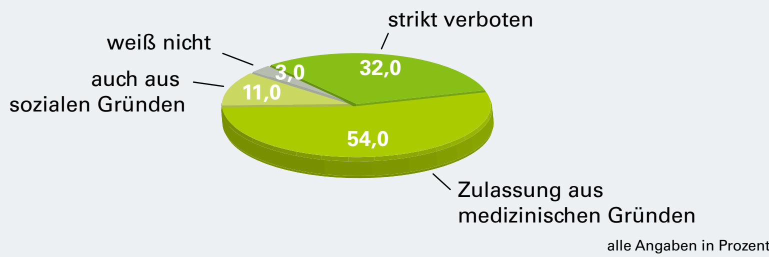
▶ **Die Geschlechtswahl** kommt für Paare in Frage, die bereits zwei oder drei Kinder desselben Geschlechts haben und sich noch ein Kind des jeweils anderen Geschlechts wünschen. Hierzu werden die Embryonen mit Hilfe der PID auf ihre Geschlechtschromosomen untersucht. Anschließend werden der Frau, je nach Wunsch, ausschließlich männliche oder ausschließlich weibliche Embryonen übertragen. Seit einiger Zeit kann man die Geschlechtswahl auch ohne eine vorherige IVF und PID durchführen. Bei diesem neuen Verfahren werden die Spermien, die ein X-Chromosom tragen, von den Spermien, die ein Y-Chromosom tragen, mit Hilfe eines zellsortierenden Geräts getrennt. Frauen, die einen Sohn haben möchten, können sich dann mit den Y-Spermien befruchten lassen – und Frauen, die sich eine Tochter wünschen, mit den X-Spermien.

Was ist wo erlaubt?

	Eizellspende	Leihmutterschaft	Geschlechtswahl	Klonen
USA	✓	✓	✓	○
Großbritannien	✓	✓	○	○
Schweden	✓	○	○	○
Deutschland	○	○	○	○

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: EDGAR DAHL

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK, NACH: E. DAHL, M. BEUTEL, K.-D. HINSCH, B. BROSIG, IN: REPRODUCTIVE BIOMEDICINE ONLINE 2004, BD. 9, HEFT 6, S. 600



Bei einer Umfrage zur möglichen Geschlechtswahl vor einer künstlichen Befruchtung stimmten 54 Prozent für eine Zulassung aus medizinischen Gründen, 11 Prozent für eine generelle Freigabe.

Regel versuchen sie zu entscheiden, ob ein bestimmtes Verfahren moralisch zulässig oder unzulässig ist. Angesichts der Tatsache, dass wir in einer pluralistischen Gesellschaft leben, in der die Menschen unterschiedliche Moralvorstellungen haben, wird sich über diese Frage jedoch nie Einigkeit erzielen lassen. Die Frage, die solche Kommissionen tatsächlich prüfen sollten, lautet daher vielmehr: Würde die Zulassung eines bestimmten reproduktionsmedizinischen Verfahrens nachweislich eine Schädigung Dritter beinhalten und somit überhaupt die unerlässliche Voraussetzung für eine strafrechtliche Sanktionierung erfüllen?

In Kanada meinte die Royal Commission on New Reproductive Technologies, die Gesetze eines demokratischen Staates sollten die Werte seiner Bürger widerspiegeln. Das ist gewiss schön formuliert, setzt aber voraus, dass ein Staat tatsächlich auf gemeinsamen Werten beruht. Pluralistische Gesellschaften sind jedoch – per Definition – Gesellschaften mit unterschiedlichen Werten. Daher läuft das Bemühen, Gesetze auf gemeinsame Werte gründen zu wollen, in aller Regel wieder nur darauf hinaus, dass der Staat es einer Mehrheit gestattet, einer Minderheit ihre Werte aufzuzwingen.

Verbrechen ohne Opfer

In Großbritannien beschloss das Committee of Inquiry into Human Fertilisation and Embryology, dass reproduktionsmedizinische Verfahren nur dann zugelassen werden sollten, wenn sie »notwendig und wünschenswert« sind. Doch wie genau soll man diese hoffnungslos dehnbaren Begriffe verstehen? Darüber, was »wünschenswert« ist, werden Anglikaner, Agnostiker, Atheisten, Hinduisten und Muslime mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit unterschiedlicher Ansicht gewesen sein. Selbst bei dem weitaus unzweideutigeren Begriff »notwendig« dürfte eine nicht unbeträchtliche Zahl von Menschen nach wie vor der Ansicht sein, es sei schlicht und einfach nicht notwendig, unfruchtbaren Paaren mit kostspieligen Methoden zu einem Nachwuchs zu verhelfen, solange auf dieser Welt Millionen hungernder Kinder leben, die adoptiert werden könnten. Wenn die Briten dennoch ein für deutsche Verhältnisse überaus liberales Gesetz verabschiedet haben, kann dies wohl nur darauf beruhen, dass sie bereit waren, die individuellen Rechte ihrer Bürger zu respektieren und deren Fortpflanzungsfreiheit nur insoweit zu beschneiden, als es zur Verhinderung einer Schädigung Dritter unbedingt erforderlich ist.

Das Select Committee on Science and Technology des britischen Unterhauses hat sich unlängst denn auch klar zu seinem liberalen Ansatz bekannt. In seinem am 24. März 2005 vorgelegten Bericht »Human Reproductive Technologies and the Law« erklärte es, dass es keine Rechtfertigung dafür gebe, den Zugang zur reproduktionsmedizinischen Behandlung auf heterosexuelle Ehepaare zu beschränken. Entsprechend forderte es, alleinstehende Frauen und lesbische Paare mit Kinderwunsch gleichfalls zu behandeln. Darüber hinaus schlug es vor, neben der bereits seit vielen Jahren praktizierten Eizellspende und Leihmutterschaft auch die vorgeburtliche Geschlechtswahl zuzulassen (siehe Kasten S. 119).

In einer freien Gesellschaft müssen wir damit leben, dass Menschen vieles tun, mit dem wir nicht einverstanden sind. Wir mögen ihre Entscheidungen missbilligen und – vorausgesetzt, sie sind bereit zuzuhören – mit ihnen darüber reden; doch solange sie mit dem, was sie tun, anderen keinen Schaden zufügen, haben wir kein Recht, sie mit Gewalt daran zu hindern, und zwar selbst dann nicht, wenn dies zum Wohle der Gesellschaft oder gar zu ihrem eigenen Besten wäre. Heiße ich es gut, dass einige Paare von der Reproduktionsmedizin Gebrauch machen, um das Geschlecht ihrer Kinder auszuwählen? Nein! Doch dies gibt mir nicht das Recht, einen Arzt, der bereit ist, ihnen zu helfen, ins Gefängnis werfen zu lassen.

Im Vergleich mit muslimischen Ländern, in denen beispielsweise Ehebruch noch bestraft wird, halten wir uns viel darauf zugute, dass hier zu Lande ähnlich »überholte« Paragrafen längst aus dem Strafgesetzbuch gestrichen wurden. Promiskuität, Prostitution, Pornografie und Homosexualität gelten heute, sofern sie einvernehmlich und unter Volljährigen erfolgen, als »Verbrechen ohne Opfer«. Doch was sind die Eizellspende, die Leihmutterschaft und die Geschlechtswahl anderes als opferlose Verbrechen? Es ist daher an der Zeit, dass das Embryonenschutzgesetz endlich einem neuen, liberalen Fortpflanzungsmedizingesetz weicht.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Dr. Edgar Dahl ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum für Gynäkologie der Justus-Liebig-Universität Gießen. Er hat gerade ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördertes Projekt mit dem Titel »ReproGenEthics: Fortpflanzungsmedizin in einer pluralistischen Gesellschaft« abgeschlossen. Neben Fragen der Bioethik beschäftigen ihn Probleme der Moralphilosophie, Rechtsphilosophie und Religionsphilosophie.

Bioethik zwischen Natur und Interesse. Von Dieter Birnbacher. Suhrkamp, Frankfurt 2006

Ethik des Embryonenschutzes. Von Norbert Hoerster. Reclam, Stuttgart 2002

Forschungsobjekt Embryo. Von Reinhard Merkel. dtv, München 2002

Eine Frage des Lebens. Von Anton Leist. Campus, Frankfurt 1990

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Die Quark-Ursuppe kocht

In gigantischen Teilchenbeschleunigern wiederholen Physiker den Urzustand der Materie. Dieses Quark-Gluon-Medium verhält sich ganz anders als gedacht

JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

WEITERE THEMEN IM NOVEMBER

Ölpreis und Demokratie

Ein Demokratiedefizit in den Ölförderländern des Nahen Ostens ist ursächlich dafür, dass Erdöl jahrzehntelang unrealistisch billig war. Der Übergang zu einem funktionierenden Ölmarkt ist von Instabilität bedroht

Zum Verlieben schön

Verhaltensbiologen ergründen die Geheimnisse der menschlichen Attraktivität

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

AKG BERLIN



JUSTINE COOPER

Mutterschaft – Gewinn fürs Gehirn

Zumindest bei Tieren bringen Schwanger- und Mutterschaft einen Zugewinn an intellektuellen Leistungen. Auch das menschliche Gehirn scheint sich unter den Hormoneinflüssen zu verändern



Schutzschilde für Raumfahrer

Wird der bemannte Flug zum Mars scheitern, weil die kosmische Strahlung das Leben der Raumfahrer bedroht? Existierende Schutzmaßnahmen reichen jedenfalls kaum aus

PAT RAWLINGS / SAIC